

Carbon emission trading for the design of sustainable chemical supply chain networks under uncertainty



Máster en Ingeniería Química

Trabajo Fin de Máster

Autor:

María Dolores García Rubio

Tutor/es:

José Antonio Caballero Suarez

José Rubén Ruiz Femenia

Raquel Salcedo Díaz



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice

Abstract.....	4
Resumen	4
1. Introducción.....	5
2. Formulación del modelo de optimización	6
2.1. Planteamiento del problema.....	6
2.2. Modelo matemático	8
2.2.1. Ecuaciones de balance de materia	8
2.2.2. Restricciones de capacidad.....	10
2.2.3. Función objetivo.....	12
3. Caso de estudio	17
4. Método de resolución	24
4.1. Generación de escenarios.....	24
4.2. Estimación de la desviación estándar	24
4.3. Método de resolución: Sample Average Approximation	25
5. Resultados y Conclusiones	28
5.1. Influencia del número de escenarios en la configuración de la cadena de suministro.....	29
5.1.2. Resolución con 50 escenarios	29
5.1.3. Resolución con 100 escenarios	33
5.1.4. Comparación de los resultados obtenidos al resolver el problema de optimización con un número de escenarios diferente	36
5.2. Influencia de la desviación estándar del precio de los derechos de emisión de CO ₂ en la configuración de la cadena de suministro	38
5.2.1. Influencia de valores altos de la desviación estándar en la configuración de la cadena de suministro	38
5.2.2. Influencia de valores bajos de la desviación estándar en la configuración de la cadena de suministro	42
5.2.3. Comparación de los resultados obtenidos al resolver el problema de optimización con una alta y baja desviación estándar en el precio de los derechos de emisión de CO ₂	46
6. Bibliografía.....	48
7. Notación	50
Índices	50
Conjuntos	50
Parámetros	50

Variables 52

8. Anexos 55

8.1. Cálculo desviación estándar..... 55

Abstract

Currently, one of the priorities in the design of any chemical process plant is the reduction of CO₂ emissions. In this paper, we study the effect of incorporating a policy called Carbon Trading in the design of a supply chain in the presence of uncertainty in the price of CO₂ emission rights. To deal with this uncertainty, which inevitably leads to a more complex problem, the supply chain design has been mathematically formulated as a multi-scenario mixed-integer stochastic linear programming (MILP) model, to maximize economic profit and minimize environmental impact. The uncertain parameter is modeled from a set of scenarios with a given probability of occurrence. To quantify the environmental impact of the supply chain, the principles of Life Cycle Assessment (LCA) have been followed, which are incorporated in the formulation of the model through standard algebraic equations. The capabilities of the proposed model and resolution process have been illustrated through a case study, for which efficient solutions have been calculated from the environmental and economic point of view. These solutions provide a valuable insight into the design problem and guide the decision maker towards more sustainable alternative designs.

Resumen

Actualmente, uno de los objetivos prioritarios en el diseño de cualquier planta de procesos químicos es la reducción de emisiones de CO₂. En este trabajo se estudia el efecto de incorporar una política denominada *Carbon Trading* en el diseño de una cadena de suministro en presencia de incertidumbre en el precio de los derechos de emisión de CO₂. Para afrontar dicha incertidumbre, que inevitablemente complica el problema, el diseño de la cadena de suministro se ha formulado matemáticamente como un *mixed-integer linear program* (MILP) multiescenario, estocástico y multiobjetivo, ya que es capaz de maximizar el beneficio económico y minimizar el impacto medioambiental para un escenario dado. El parámetro incierto se modela a partir de un conjunto de escenarios donde cada uno de ellos presenta una probabilidad de ocurrencia. Para cuantificar el impacto medioambiental de la cadena de suministro se han seguido los principios del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), los cuales son incorporados en la formulación del modelo a través de ecuaciones algebraicas estándar. Las capacidades del modelo y del proceso de resolución propuestos se ha ilustrado a través de un caso de estudio, para el cuál se han calculado las soluciones eficientes

desde el punto de vista medioambiental y económico. Estas soluciones proporcionan una valiosa perspectiva del problema de diseño, y sirven para guiar al responsable de la toma de decisiones hacia la elección de diseños alternativos más sostenibles.

1. Introducción

Los modelos de optimización desarrollados en ingeniería de sistemas de proceso se han centrado tradicionalmente en encontrar la solución de diseño que maximice un indicador económico dado, satisfaciendo un conjunto de restricciones operativas impuestas por la tecnología de proceso o la topología de la red de la cadena de suministro. Sin embargo, en los últimos años, ha aumentado el interés por introducir indicadores medioambientales en la optimización de procesos [1]. Este hecho viene motivado por el endurecimiento de las regulaciones medioambientales llevadas a cabo por gobiernos y agencias de reguladoras [2].

El interés por incorporar técnicas de prevención de la contaminación en el diseño de procesos se remonta a los años setenta. Desde entonces, se han propuesto numerosos enfoques para reducir el consumo de energía y recursos en las plantas químicas [3]. La principal desventaja de estas estrategias era que normalmente se centraban en la producción, y por este motivo, su alcance se limitaba. Además, este tipo de estrategias pueden derivar en soluciones que reducen el impacto medioambiental localmente a expensas de incrementar los efectos negativos sobre otras etapas del ciclo de vida del producto, así que, en conjunto, el impacto medioambiental aumenta. Para eliminar esta desventaja se han de extender los límites del problema más allá de la etapa de producción e incluir las actividades logísticas. Así, en la última década queda patente que las cuestiones medioambientales deben ser tenidas en cuenta en toda la cadena de producción.

En este escenario, la oportunidad para gestionar las emisiones de CO₂ de forma efectiva de una empresa depende de la capacidad de la misma para tener una vista global de su responsabilidad y coste asociado, desde el punto de vista del ciclo de vida. Limitar las emisiones de efecto invernadero y establecer un precio para comerciar con ellas es el fundamento esencial para la política de cambio climático *Carbon Trading*. La idea que subyace bajo este esquema es convertir la reducción de emisiones de CO₂ en un incentivo económico, ya que tras fijar un límite en las emisiones, las compañías pueden

comprar o vender entre ellas derechos para emitir gases de efecto invernadero. Las compañías que excedan el límite de emisiones tienen que comprar derechos extra para cubrir dicho exceso. Mientras que aquellas compañías que no alcanzan el límite de emisiones, pueden venderlos, suministrando así un ingreso extra a las compañías menos contaminantes [4].

Actualmente existen varios mercados de derechos de emisión de CO₂ activos como lo son el *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS), el *New Zeland Emissions Trading Scheme* (NZ ETS), the *Chicago Climate Exchange*, y el *Montreal Climate Exchange* [5]. Los aspectos clave para conseguir una política de comercio de derechos de CO₂ con éxito es la definición del límite de libres emisiones y la definición de los precios derechos de emisión de CO₂ para cada industria.

En este marco, este trabajo pretende incorporar cuestiones medioambientales en el nivel estratégico de la cadena de suministro. En concreto, este trabajo se centra en la obtención de procesos químicos sostenibles, con un diseño y una planificación óptimos, y en la creación de una herramienta cuantitativa basada en programación matemática para facilitar la toma de decisiones dentro de la cadena de suministro. Finalmente, la principal característica de este trabajo es la consideración de la incertidumbre en el precio de los derechos de emisión de CO₂.

2. Formulación del modelo de optimización

En este apartado se presenta una definición formal del problema objeto de estudio y el modelo matemático desarrollado para enfocar dicho problema.

2.1. Planteamiento del problema

La finalidad del problema de diseño abordado en este trabajo es determinar la configuración de una cadena de suministro que se extiende en tres niveles (producción, almacenaje y mercado) maximizando el beneficio económico y minimizando el impacto medioambiental. La topología de la cadena de suministro en tres niveles tomada como referencia en este trabajo se representa en la Figura 1.

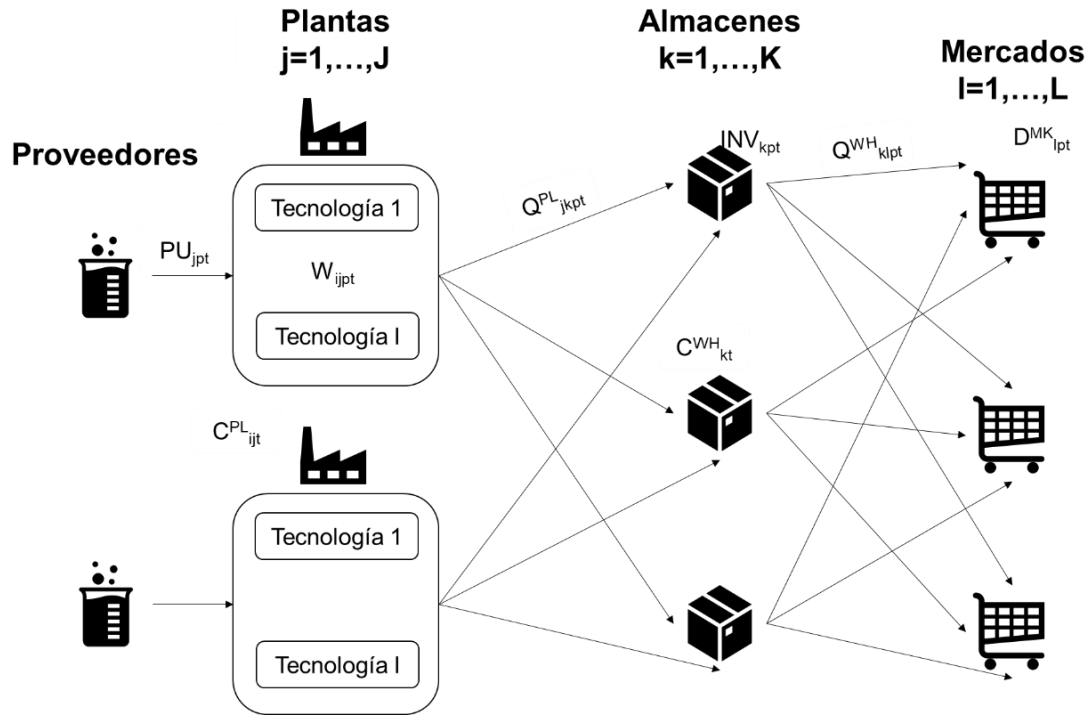


Figura 1. Estructura de la cadena de suministro del problema objeto de estudio.

Como se puede observar en la Figura 1, la cadena de suministro de referencia incluye en su configuración un conjunto de plantas de producción que cuentan con una serie de tecnologías de proceso disponibles para fabricar los productos. En la estructura de la cadena de suministro también se incluye un conjunto de almacenes para poder almacenar los productos antes de enviarlos a un conjunto de mercados y ponerlos a disposición de los clientes.

El objetivo que se quiere alcanzar al diseñar esta cadena de suministro respetuosa con el medioambiente es obtener aquella configuración que maximice el beneficio económico y minimice el impacto medioambiental. Para ello será necesario tomar una serie de decisiones, entre las que se incluirán: decisiones estructurales (número, localización y capacidades de las plantas de producción y almacenes a instalar; líneas de transporte entre las diferentes localizaciones) y decisiones de planificación (tasas de producción de cada planta en cada periodo de tiempo; flujos de transporte entre cada localización).

Los datos disponibles en base a los que se toman las decisiones son: el horizonte de tiempo, la demanda y precio de productos en cada mercado, los costes fijos y variables derivados de la expansión de capacidad de las plantas y almacenes, los costes fijos para

establecer las conexiones entre las distintas localizaciones, los límites de expansión de plantas y almacenes, los costes asociados con la operación de la cadena de suministro, el tipo de interés, tasa fiscal y valor residual.

2.2. Modelo matemático

La estructura general del modelo matemático propuesto se basa en el presentado por Guillén-Gosálbez y Grossmann [6]. El modelo ha sido formulado como un *mixed-integer linear program* (MILP) teniendo en cuenta todas las características asociadas a la cadena de suministro en tres niveles anteriormente presentada, aunque podría ser extendido a topologías más complejas de forma sencilla.

El modelo se puede dividir en dos bloques, en el primer bloque se incluirían las variables estructurales (no se ven afectadas por la incertidumbre), y que están relacionadas con las decisiones estratégicas o estructurales, y en el segundo, las variables operacionales (se ven afectadas por la incertidumbre), relacionadas con las decisiones de planificación.

Las ecuaciones que han sido utilizadas para formular el modelo se clasifican en tres grupos: ecuaciones de balance de masa, restricciones de capacidad y función objetivo.

2.2.1. Ecuaciones de balance de materia

En cada uno de los nodos de la superestructura de la cadena de suministro se debe cumplir un balance de materia. Así en cada periodo de tiempo t , para cada planta j , producto químico p y escenario s , se cumple que la cantidad de producto comprada más la cantidad de producto producida debe ser igual a la cantidad de producto transportada desde la planta hasta cada uno de los almacenes más la cantidad de producto consumida.

$$PU_{j,p,t,s} + \sum_{i \in OUT(p)} W_{i,j,p,t,s} = \sum_k Q_{j,k,p,t,s}^{PL} + \sum_{i \in IN(p)} W_{i,j,p,t,s} \quad \forall j, p, t, s \quad (1)$$

En la ecuación 1, $PU_{j,p,t,s}$ representa la cantidad de producto p comprado por la planta j en el periodo de tiempo t y escenario s , $W_{i,j,p,t,s}$ denota el flujo de entrada/salida de p asociado con la tecnología i en la planta j en el periodo de tiempo t y escenario s ; y finalmente, $Q_{j,k,p,t,s}^{PL}$ es la cantidad de p transportada entre la planta j y el almacén k en el periodo de tiempo t y escenario s . En cuanto a las compras de productos, cabe decir que pueden ser de materia prima o de productos finales; y para cada producto, las

compras totales están restringidas entre un valor mínimo ($\underline{PU_{j,p,t}}$) y un valor máximo ($\overline{PU_{j,p,t}}$), los cuales vienen dados por su disponibilidad en el mercado:

$$\underline{PU_{j,p,t}} \leq PU_{j,p,t,s} \leq \overline{PU_{j,p,t}} \quad \forall j, p, t, s \quad (2)$$

Además, se debe cumplir un balance de materia para cada tecnología i explotada en la planta j , el cual es representado por la ecuación 3.

$$W_{i,j,p,t,s} = \mu_{i,p} W_{i,j,p',t,s} \quad \forall j, p, t, s \quad \forall p' \in MP(i) \quad (3)$$

Donde μ_{ip} denota el coeficiente de balance de materia para la tecnología i y producto p , mientras que $MP(i)$ es el conjunto de productos que se corresponde con cada tecnología.

El balance de materia que se ha de cumplir en los almacenes viene determinado por la ecuación 4.

$$INV_{k,p,t-1,s} + \sum_j Q_{j,k,p,t,s}^{PL} = \sum_l Q_{k,l,p,t,s}^{WH} + INV_{k,p,t,s} \quad \forall k, p, t, s \quad (4)$$

Donde el inventario inicial $INV_{k,p,t-1,s}$ más la cantidad de producto transportada desde las plantas hasta el almacén k debe ser igual al flujo de producto transportado desde los almacenes hasta los mercados ($Q_{k,l,p,t,s}^{WH}$) más el inventario final.

La cantidad de productos enviados desde los almacenes a los mercados determinan las ventas de productos en cada mercado ($SA_{l,p,t,s}$), como se puede observar en la ecuación 5.

$$\sum_k Q_{k,l,p,t,s}^{WH} = SA_{l,p,t,s} \quad \forall l, p, t, s \quad (5)$$

Finalmente, la restricción recogida en la ecuación 6 obliga a las ventas totales de producto p en el mercado l en el periodo de tiempo t a ser mayores que el objetivo de demanda mínima ($\underline{D_{lpt}^{MK}}$) y menor que la máxima demanda ($\overline{D_{lpt}^{MK}}$). Así, el modelo asume que parte de la demanda puede quedar insatisfecha debido a una capacidad de producción limitada o por una baja rentabilidad de los productos.

$$\underline{D_{l,p,t}^{MK}} \leq SA_{l,p,t,s} \leq \overline{D_{l,p,t}^{MK}} \quad \forall l, p, t, s \quad (6)$$

2.2.2. Restricciones de capacidad

a) Plantas

La capacidad de producción de cada tecnología i en la planta j en el periodo de tiempo t está representada por la variable continua $C_{i,j,t}^{PL}$, y está delimitada entre la capacidad máxima de la tecnología y un porcentaje mínimo (τ) de la capacidad instalada, tal y como se muestra en la ecuación 7.

$$\tau C_{ijt}^{PL} \leq W_{i,j,p,t,s} \leq C_{ijt}^{PL} \quad \forall i, j, t \quad \forall p \in MP(i) \quad (7)$$

La capacidad de la planta j en cualquier periodo de tiempo se calcula a partir de la capacidad existente al final del periodo de tiempo previo más la expansión de la capacidad llevada a cabo en el periodo de tiempo t :

$$C_{i,j,t}^{PL} = C_{i,j,t-1}^{PL} + CE_{i,j,t}^{PL} \quad \forall i, j, t \quad (8)$$

Donde $CE_{i,j,t}^{PL}$ representa la expansión de la capacidad de la tecnología i que ha tenido lugar en el periodo de tiempo t en la planta j . Para limitar la capacidad de expansión entre un límite superior ($\overline{CE_{i,j,t}^{PL}}$) e inferior ($\underline{CE_{i,j,t}^{PL}}$) se utiliza la ecuación 9.

$$\underline{CE_{i,j,t}^{PL}} X_{i,j,t}^{PL} \leq CE_{i,j,t}^{PL} \leq \overline{CE_{i,j,t}^{PL}} X_{i,j,t}^{PL} \quad \forall i, j, t \quad (9)$$

En la ecuación 9 se introduce, por primera vez, una variable binaria $X_{i,j,t}^{PL}$, que sirve para indicar si tiene lugar la expansión de la capacidad. De este modo, toma el valor 1 cuando la tecnología i de la planta j expande su capacidad en el periodo de tiempo t , y 0 cuando dicha tecnología no se expande. Además, el número de expansiones ($nexp_{i,j}^{PL}$) de la tecnología i disponible en la planta j está limitado por la ecuación 10 para todo el tiempo de horizonte.

$$\sum_t X_{i,j,t}^{PL} \leq nexp_{i,j}^{PL} \quad \forall i, j \quad (10)$$

De este modo, el modelo asume que la capacidad de expansión debe comenzar y finalizar dentro del mismo periodo de tiempo.

b) Almacenes

La capacidad de los almacenes también está representada por una variable continua ($C_{k,t}^{WH}$). Como se puede observar en la ecuación 11, el inventario total del que dispone un almacén k está obligado a ser menor que su capacidad en cada periodo de tiempo t .

$$\sum_p INV_{k,p,t,s} \leq C_{k,t}^{WH} \quad \forall k, t, s \quad (11)$$

Además, la cantidad de productos transportados desde un almacén hasta los distintos mercados está limitada por su capacidad. En consecuencia, el modelo asume que la capacidad requerida para manejar una cantidad dada de productos es el doble del nivel de inventario medio que se mantiene en el almacén [7], y está denotado por IL_{kt} .

$$2IL_{k,t} \leq C_{k,t}^{WH} \quad \forall k, t \quad (12)$$

El valor del nivel de inventario medio del almacén k se calcula a partir del flujo de salida de producto y el índice de rotación del almacén (tor_k), que representa el número de veces que el stock es completamente reemplazado por periodo de tiempo:

$$IL_{k,t} = \frac{\sum_l \sum_p Q_{k,l,p,t,s}^{WH}}{tor_k} \quad \forall k, t, s \quad (13)$$

Finalmente, la capacidad del almacén en cualquier periodo de tiempo se determina a partir de la capacidad en el periodo de tiempo previo y la expansión de la capacidad que tiene lugar en dicho periodo:

$$C_{k,t}^{WH} = C_{k,t-1}^{WH} + CE_{k,t}^{WH} \quad \forall k, t \quad (14)$$

Como sucedía con las plantas, el valor de la capacidad de expansión de los almacenes ($CE_{k,t}^{WH}$) también está restringida entre límites superiores e inferiores, tal y como indica la ecuación 15:

$$\underline{CE_{k,t}^{WH}} X_{k,t}^{WH} \leq CE_{k,t}^{WH} \leq \overline{CE_{k,t}^{WH}} X_{k,t}^{WH} \quad \forall k, t \quad (15)$$

La restricción 15 incluye la variable binaria $X_{k,t}^{WH}$, que toma el valor 1 cuando tiene lugar una expansión de capacidad del almacén k en el periodo de tiempo t , y 0 cuando

no. Además, el número de expansiones ($nexp_k^{WH}$) que pueden tener lugar en el almacén k durante todo el tiempo de horizonte está limitado según lo indicado en la ecuación 16:

$$\sum_t X_{k,t}^{WH} \leq nexp_k^{WH} \quad \forall k \quad (16)$$

c) Conexiones de transporte

La existencia de una conexión de transporte entre dos nodos adyacentes cualquiera de la red de la cadena de suministro viene dada por las variables binarias $Y_{j,k,t,s}^{PL}$ y $Y_{k,l,t,s}^{WH}$. Cuando dichas variables toman el valor 0 no existe un flujo de producto ($Q_{j,k,p,t,s}^{PL}$ y $Q_{k,l,p,t,s}^{WH}$) entre los correspondientes nodos en el periodo de tiempo t . Pero cuando toman el valor 1 indican que existe un flujo de producto entre los mencionados nodos dentro de los límites superiores e inferiores establecidos. Las ecuaciones 17 y 18 definen el comportamiento de dichas variables binarias:

$$\underline{Q_{j,k,p,t}^{PL}} Y_{j,k,t,s}^{PL} \leq Q_{j,k,p,t,s}^{PL} \leq \overline{Q_{j,k,p,t}^{PL}} Y_{j,k,t,s}^{PL} \quad \forall j, k, t, s \quad (17)$$

$$\underline{Q_{k,l,p,t}^{WH}} Y_{k,l,t,s}^{WH} \leq Q_{k,l,p,t,s}^{WH} \leq \overline{Q_{k,l,p,t}^{WH}} Y_{k,l,t,s}^{WH} \quad \forall k, l, t, s \quad (18)$$

2.2.3. Función objetivo

El modelo que se ha diseñado para optimizar la cadena de suministro descrita anteriormente debe lograr dos objetivos; el económico y el medioambiental.

El rendimiento económico de la cadena de suministro se mide a través del indicador económico NPV (*Net Present Value*). De este modo, uno de los objetivos del modelo matemático será maximizar el valor medio de la distribución de NPV resultante. Por otra parte, para medir el rendimiento medioambiental se utilizará el indicador GWP 100 (*Global Warming Potential*) que está basado en los principios de Análisis de Ciclo de Vida o LCA (*Life Cycle Assessment*). El cálculo de cada una de estas métricas se describe en detalle a continuación.

a) NPV

Al final del tiempo de horizonte, se obtienen diferentes valores de NPV para cada uno de los escenarios s estudiados. Así, una vez desvelada la incertidumbre, el modelo propuesto maximiza el valor esperado ($E[NPV]$) de la distribución de NPV_s obtenida.

$$E[NPV] = \sum_s prob_s NPV_s \quad (19)$$

En la ecuación 19, $prob_s$ es la probabilidad de ocurrencia del escenario s . En cuanto al valor del NPV_s , éste se calcula como la suma de los flujos de efectivo descontados generados en cada uno de los períodos de tiempo en que se divide el tiempo de horizonte ($CF_{t,s}$):

$$NPV_s = \sum_t \frac{CF_{t,s}}{(1 + ir)^{t-1}} \quad \forall s \quad (20)$$

Donde ir representa el tipo de interés. El flujo de efectivo en cada periodo de tiempo es calculado a partir de los beneficios netos $NE_{t,s}$ y la fracción del importe depreciable total ($FTDC_{t,s}$) que se corresponde con el periodo:

$$CF_{t,s} = NE_{t,s} - FTDC_{t,s} \quad t = 1, \dots, NT - 1, \forall s \quad (21)$$

En el modelo formulado se tiene en cuenta que parte del capital fijo total invertido (FCI) puede ser recuperado al final del tiempo de horizonte, lo que influye en el cálculo del flujo de efectivo del último periodo de tiempo ($t = NT$).

$$CF_{t,s} = NE_{t,s} - FTDC_{t,s} + svFCI \quad t = NT, \forall s \quad (22)$$

En la ecuación 22, sv representa el valor de rescate de la cadena de suministro, cuyo valor puede variar en función del tipo de industria.

Las ganancias netas ($NE_{t,s}$) vienen dadas por la diferencia entre los ingresos y el gasto total, tal y como se indica en la ecuación 23. Los ingresos se determinan a partir de las ventas de productos finales, mientras que el gasto total se compone de las compras de materias primas, de los gastos de operación e inventario asociados a las distintas plantas y almacenes y el gasto de transporte de productos entre los nodos de la cadena de suministro.

$$\begin{aligned}
 NE_{t,s} = (1 - \varphi) & \left[\sum_l \sum_p \gamma_{l,p,t}^{FP} SA_{l,p,t,s} \right. \\
 & - \sum_j \sum_p \gamma_{j,p,t}^{RM} PU_{j,p,t,s} \\
 & - \sum_i \sum_j \sum_{p \in MP(i)} v_{i,j,p,t} W_{i,j,p,t,s} - \sum_k \pi_{k,t} IL_{k,t} \\
 & \left. - \sum_j \sum_k \sum_p \omega_{j,k,p,t}^{PL} Q_{j,k,p,t,s}^{PL} - \sum_k \sum_l \sum_p \omega_{k,l,p,t}^{WH} Q_{k,l,p,t,s}^{WH} \right] \\
 & + \varphi DEP_{t,s} \quad \forall t, s
 \end{aligned} \tag{23}$$

En la ecuación 23, φ denota el impuesto fiscal, mientras que $\gamma_{l,p,t}^{FP}$ y $\gamma_{j,p,t}^{RM}$ son los precios de los productos finales y de las materias primas, respectivamente. Además, $v_{i,j,p,t}$ denota el coste de producción por unidad de producto final p fabricado con la tecnología i en la planta j durante el periodo de tiempo t , $\pi_{k,t}$ representa el coste de inventario por unidad de producto almacenado en el almacén k durante el periodo de tiempo t , y $\omega_{j,k,p,t}^{PL}$ y $\omega_{k,l,p,t}^{WH}$ son los costes unitarios de transporte.

En cuanto a la depreciación el capital invertido, el método sigue lo establecido por el método de la línea recta:

$$DEP_{t,s} = \frac{(1 - sv)FCI}{NT} \quad \forall t, s \tag{24}$$

Donde FCI designa el coste fijo total de inversión, el cuál es determinado a partir de las expansiones de capacidad que tienen lugar en las plantas y los almacenes, así como a partir de las conexiones de transporte establecidas durante todo el tiempo de horizonte, como se puede apreciar en la ecuación 25:

$$\begin{aligned}
 FCI = \sum_i \sum_j \sum_t & (\alpha_{i,j,t}^{PL} CE_{i,j,t}^{PL} + \beta_{i,j,t}^{PL} X_{i,j,t}^{PL}) + \sum_k \sum_t (\alpha_{k,t}^{WH} CE_{k,t}^{WH} \\
 & + \beta_{k,t}^{WH} X_{k,t}^{WH}) + \sum_j \sum_k \sum_t (\beta_{j,k,t}^{TPL} Y_{j,k,t,s}^{PL}) + \sum_k \sum_l \sum_t (\beta_{k,l,t}^{TWH} Y_{k,l,t,s}^{WH})
 \end{aligned} \tag{25}$$

En este caso, los parámetros $\alpha_{i,j,t}^{PL}$, $\beta_{i,j,t}^{PL}$ y $\alpha_{k,t}^{WH}$, $\beta_{k,t}^{WH}$ son los términos de inversión variables y fijos correspondientes a las plantas y los almacenes, respectivamente. Por otra parte, $\beta_{j,k,t}^{TPL}$ y $\beta_{k,l,t}^{TWH}$ son los términos de inversión fijos asociados al establecimiento

de conexiones de transporte entre plantas y almacenes, y almacenes y mercados, respectivamente. La cantidad total invertida está limitada por la máxima cantidad que se esté dispuesto a invertir:

$$FCI \leq \overline{FCI} \quad (26)$$

Finalmente, el modelo asume que el pago de la inversión fija total se divide en cantidades iguales para cada periodo de tiempo. Así, la fracción del capital depreciable total ($FTDC_{t,s}$) se calcula tal y como se indica en la ecuación 27:

$$FTDC_{t,s} = \frac{FCI}{NT} \quad \forall t, s \quad (27)$$

b) Función objetivo medioambiental

Para evaluar el rendimiento medioambiental de la cadena de suministro, se recurre a un enfoque que combina el Análisis del Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, LCA) con los principios de la programación matemática [8].

El análisis del Ciclo de Vida, es una herramienta cuantitativa de medida del impacto medioambiental potencial derivado del uso de una cierta tecnología industrial [9]. Esta herramienta se caracteriza por aplicar balances de masa y energía a todo el sistema objeto de estudio, en lugar de aplicarlo tan solo al proceso de interés [10].

En este trabajo se mide el impacto medioambiental de la cadena de suministro con el indicador GWP100, tal y como se describe en el IPCC 2013 (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*). El indicador GWP 100a (*Global Warming Potential*) es un índice que se utiliza para estimar la contribución relativa al calentamiento global por la emisión de 1 Kg de un gas de efecto invernadero particular en comparación con la emisión de 1 Kg de dióxido de carbono en un periodo de 100 años. La unidad de medida de este indicador es el Kg CO₂-eq o kilogramos de dióxido de carbono equivalentes.

Para determinar la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera durante la toda la vida de la cadena de suministro, se realiza un análisis de ciclo de vida, en el que se tienen en cuenta tres principales fuentes de emisión que contribuyen al calentamiento global, y por tanto, al indicador GWP: el consumo de materias primas (GWP^{RM}), la energía consumida en las instalaciones auxiliares de la cadena de

suministro (GWP^{EN}), y el transporte de productos entre los distintos nodos de la cadena de suministro (GWP^{TR}). Así, el índice de contribución al calentamiento global total (GWP_{total}) se calcula tal y como se muestra en la ecuación 28.

$$GWP_{total} = GWP^{RM} + GWP^{EN} + GWP^{TR} \quad (28)$$

Cada una de las fuentes de emisiones de efecto invernadero pueden ser expresadas matemáticamente como funciones de algunas variables continuas definidas anteriormente en el modelo, como lo son las compras de materias primas ($PU_{j,p,t,s}$), los flujos de producción en las plantas de proceso ($W_{i,j,p,t,s}$) y los flujos de transporte entre los distintos nodos de la cadena de suministro ($Q_{j,k,p,t,s}^{PL}$ y $Q_{k,l,p,t,s}^{WH}$), tal y como se puede observar en las ecuaciones 29, 30 y 31.

$$GWP^{RM} = \sum_p IMP_p^{RM} \sum_j 1 \times 10^3 PU_{j,p,t,s} \quad (29)$$

$$GWP^{EN} = IMP^{EN} \sum_i \sum_j 41 \times 10^3 \eta_{i,p}^{EN} W_{i,j,p,t,s} \quad (30)$$

$$GWP^{TR} = IMP^{TR} \left(\sum_j \sum_k \lambda_{j,k}^{PL} Q_{j,k,p,t,s}^{PL} + \sum_k \sum_l \lambda_{k,l}^{WH} Q_{k,l,p,t,s}^{WH} \right) \quad (31)$$

En las ecuaciones 29, 30 y 31, IMP_p^{RM} , IMP^{EN} y IMP^{TR} denotan los resultados acumulados de LCIA para el indicador GWP asociados al consumo de 1 Kg de materia prima p, 1 MJ de energía y el transporte de 1 Km de una tonelada de productos respectivamente. Estos valores se han obtenido de la base de datos de Ecoinvent, y se recogen en la Tabla 7.

En la ecuación 30, $\eta_{i,p}^{EN}$ representa el consumo de energía por unidad de producto manufacturado con la tecnología i (valores indicados en la Tabla 6). En esta tasa de consumo de energía se incluye la energía consumida por las instalaciones auxiliares, como la electricidad, el vapor, el fuel y el agua de refrigeración, que son convertidos en toneladas de fueloil equivalentes (TFOE), donde 1 TFOE equivale a 41,868 GJ.

En la ecuación 31, $\lambda_{j,k}^{PL}$ y $\lambda_{k,l}^{WH}$ denotan la distancia entre las plantas y los almacenes y entre los almacenes y los mercados en kilómetros, respectivamente.

Finalmente, se introduce el comercio de emisiones de CO₂ en el modelo a través de la ecuación 32.

$$Sales_{t,s}^{CO_2} + GWP_{t,s} = Max_t^{CO_2} + Buy_{t,s}^{CO_2} \quad \forall t, s \quad (32)$$

Así, según la ecuación 32, las emisiones totales de CO₂ que tienen lugar en la cadena de suministro en el periodo t y escenario s deben ser iguales al límite de libre emisiones de CO₂ ($Max_t^{CO_2}$) más los derechos de emisión extra comprados ($Buy_{t,s}^{CO_2}$) menos los derechos de emisión vendidos ($Sales_{t,s}^{CO_2}$) en el periodo de tiempo t y escenario s.

Por tanto, los ingresos netos ($Net_{t,s}^{CO_2}$) conseguidos a través del comercio de emisiones se calcula con la ecuación 33.

$$Net_{t,s}^{CO_2} = Price_{t,s}^{CO_2} Sales_{t,s}^{CO_2} - Cost_{t,s}^{CO_2} Buy_{t,s}^{CO_2} \quad \forall t, s \quad (33)$$

Donde $Cost_{t,s}^{CO_2}$ y $Price_{t,s}^{CO_2}$ representan el coste y el precio de los derechos de emisión de CO₂, respectivamente.

3. Caso de estudio

El caso de estudio que se utiliza para ilustrar la aplicación del modelo matemático planteado en el Apartado 2.2. se ha tomado del trabajo presentado por Guillén-Gosálbez y Grossmann [6] y se encuadra dentro del esquema europeo de comercio de emisiones (*European Union Emission Trading Scheme* o EU ETS).

En el caso de estudio se pretende obtener el diseño óptimo en términos económicos y medioambientales bajo incertidumbre para una cadena de suministro ya existente establecida en Europa. La superestructura que representa el caso de estudio se ilustra en la Figura 2.

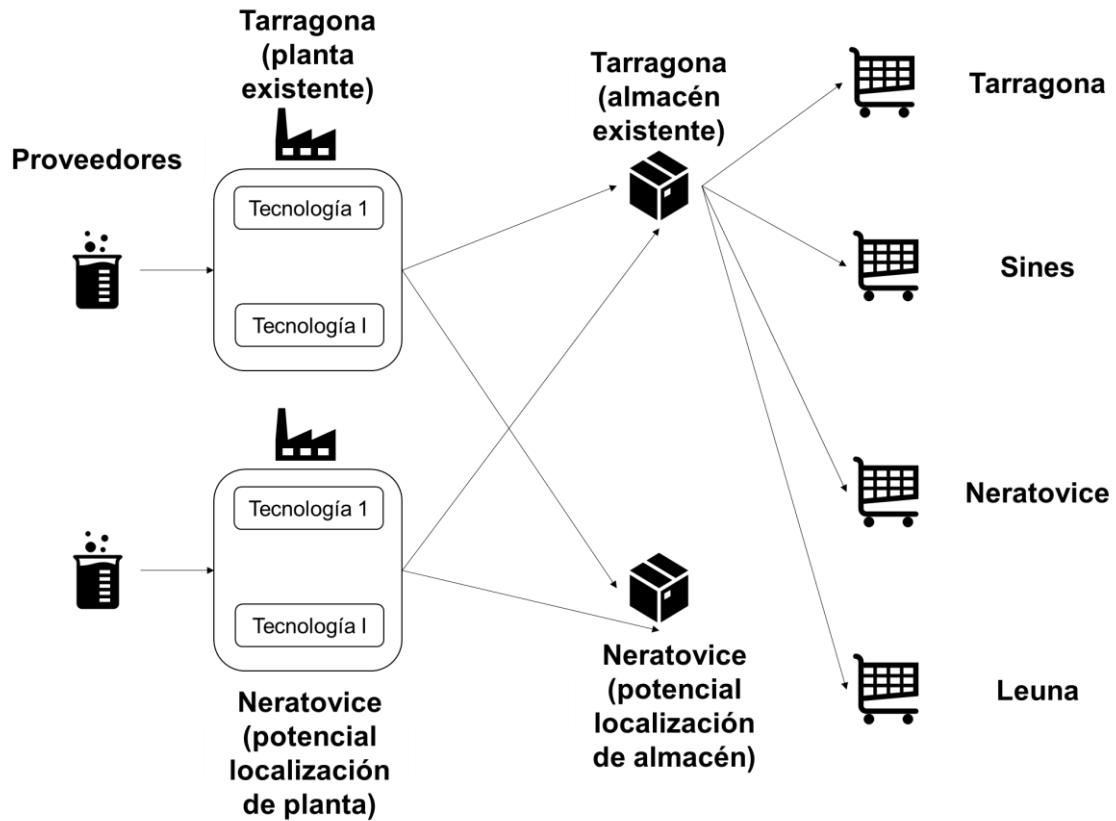


Figura 2. Superestructura del caso de estudio.

La cadena de suministro inicial está constituida por una planta de producción y un almacén que están ubicados en Tarragona (España), y por cuatro mercados que se encuentran en las siguientes ciudades europeas: Leuna (Alemania), Neratovice (República Checa), Sines (Portugal) y Tarragona.

Cada planta puede usar 6 tecnologías diferentes para fabricar 6 productos finales: acetaldehído, acrilonitrilo, isopropanol, cumeno, fenol y acetona a partir de 9 materias primas potenciales: oxígeno, etileno, cianuro de hidrogeno, ácido clorhídrico, amonio, ácido sulfúrico, propileno y benceno. En la Figura 3 se representa el esquema de las tecnologías de proceso disponibles y la masa de materia prima consumida por unidad de masa de producto final producida por cada tecnología de proceso.

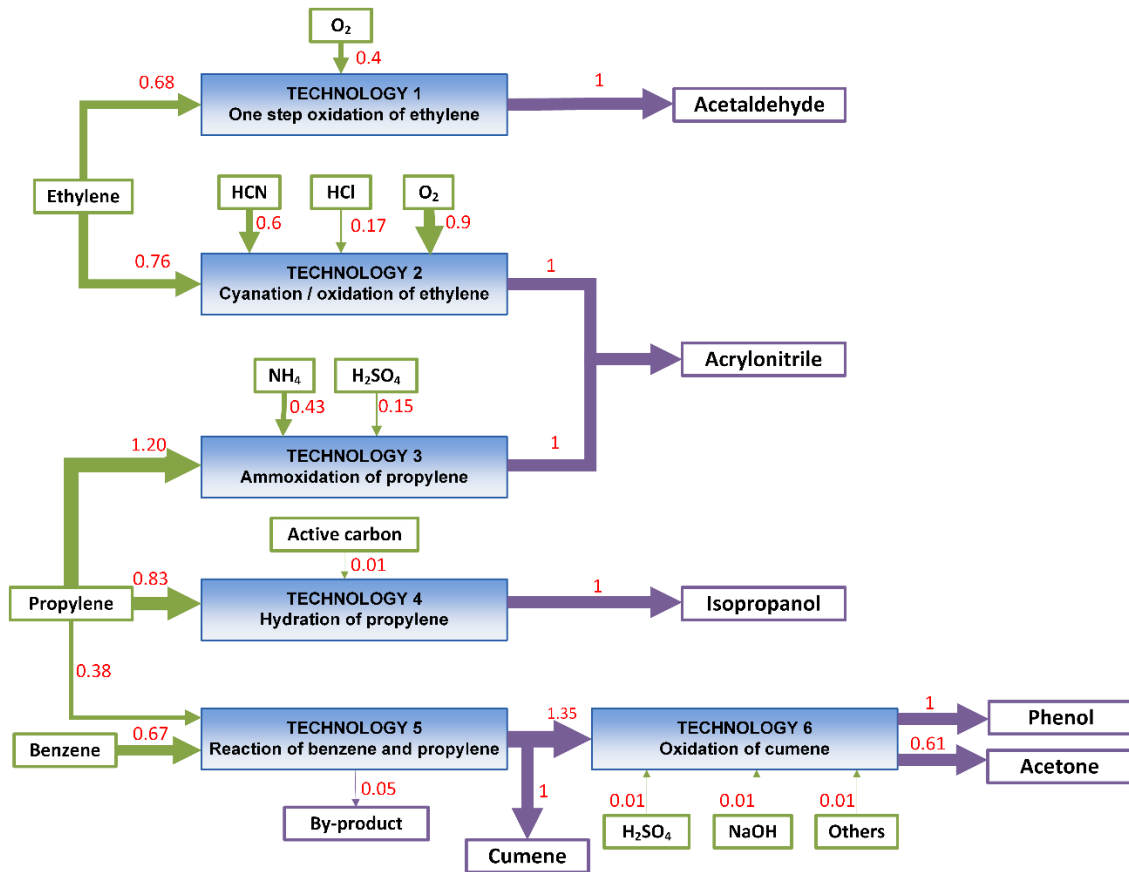


Figura 3. Conjunto de tecnologías de proceso disponibles.

La capacidad de producción de la planta existente (Tarragona) es de 100000 Tn/año para cada una de las tecnologías disponibles, y la capacidad del almacén existente, también en Tarragona, es de 100000 Tn. La capacidad de expansión de las plantas se deberá encontrar entre 50000 y 400000 Tn/año, y la capacidad de expansión de los almacenes entre 50000 y 400000 Tn. Los productos transportados entre los distintos nodos de la cadena de suministro están acotados por 5000 Tn/año y 500000 Tn/año. Además, se considera que el inventario inicial de los almacenes es cero.

En cuanto a los costes, el tipo de interés, el valor de rescate y la tasa de impuestos son iguales al 10%, 20% y 30% respectivamente. En cuanto al coste de transporte unitario, se asume un valor bajo de 0.4 cent/Tn Km. Los costes fijos asociados al establecimiento de conexiones de transporte se consideran cero.

Los inventarios de emisiones utilizados para ilustrar el caso de estudio se han obtenido de la base de datos de Ecoinvent. Las emisiones directas asociadas con las tecnologías de proceso no se han tenido en cuenta.

Como se ha indicado en la ecuación 23, los costes de transporte entre cada nodo de la cadena de suministro pueden ser calculados directamente a partir del coste unitario de transporte ($\omega_{j,k,p,t}^{PL}$ y $\omega_{k,l,p,t}^{WH}$) y las distancias entre los distintos nodos, las cuales se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Distancias entre las distintas localizaciones de la cadena de suministro.

	$\lambda_{j,k}^{PL}/\lambda_{k,l}^{WH}$ (Km)			
Producto/Mercado	Leuna	Neratovice	Sines	Tarragona
Neratovice	295.45	0	2970.72	1855.47
Tarragona	1781.36	1855.47	1212.82	0

Los costes de las materias primas en cada planta de proceso se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Costes de las materias primas en cada planta de proceso.

	$\gamma_{j,p,t}^{RM}$ (\$/Tn)	
Producto/Planta	Neratovice	Tarragona
Amonio	140.54	148.81
Benceno	200.51	212.30
Etileno	233.68	247.42
Ácido Clorhídrico	116.18	123.02
Cianuro de hidrógeno	468.47	496.03
Oxígeno	29.98	31.75
Propileno	159.28	168.65
Hidróxido de sodio	140.54	148.81
Ácido sulfúrico	42.16	44.64

Los costes de inversión variables y fijos asociados con las 6 tecnologías de proceso se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3. Costes de inversión variables y fijos asociados a las tecnologías de proceso.

Tecnología/Planta	$\alpha_{ij,t}^{PL}$ (\$ año/Tn)		$\beta_{ij,t}^{PL}$ (k\$)	
	Neratovice	Tarragona	Neratovice	Tarragona
T1	91.28	109.53	8306.45	9967.74
T2	93.43	112.12	8502.82	10203.38
T3	235.81	282.97	21459.49	25751.38
T4	104.73	125.68	9530.80	11436.97
T5	46.34	55.60	4216.72	5060.06
T6	165.59	198.70	15069.01	18082.81

La demanda de productos finales en cada uno de los mercados se recoge en la Tabla 4.

Tabla 4. Demanda de productos finales en cada mercado.

Producto/Mercado	$\overline{D}_{l,p,t}^{MK}$ (Tn/año)			
	Leuna	Neratovice	Sines	Tarragona
Acetaldehído	13500	37500	12000	7500
Acetona	10800	30000	9600	6000
Acrilonitrilo	18000	50000	16000	10000
Cumeno	13500	37500	12000	7500
Isopropanol	9000	25000	8000	5000
Fenol	12600	35000	11200	7000

La Tabla 5 recoge el precio de los productos finales en cada uno de los mercados en los que se venden en \$/Tn.

Tabla 5. Precio de los productos finales.

	$\gamma_{l,p,t}^{FP}$ (\$/Tn)			
Producto/Mercado	Leuna	Neratovice	Sines	Tarragona
Acetaldehído	509.26	487.43	491.07	500.17
Acetona	432.87	414.32	417.41	425.14
Acrilonitrilo	36.40	34.84	35.10	35.75
Cumeno	401.23	384.04	386.90	394.07
Isopropanol	401.23	384.04	386.90	394.07
Fenol	709.88	679.45	684.52	697.20

El consumo de energía de cada tecnología se expresa en TFOE por tonelada producida, y sus valores se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6. Consumo de energía asociado a cada tecnología.

Tecnología	$\eta_{i,p}^{EN}$ (FOET/Tn)
T1	0.22
T2	0.60
T3	0.15
T4	0.38
T5	0.06
T6	0.38

Finalmente, en la Tabla 7 se muestra los resultados de LCIA de acuerdo con el IPCC 2013 asociados con las materias primas procesadas, la energía consumida por las instalaciones y el transporte en Kg CO₂-eq/Kg; Kg CO₂-eq/MJ y Kg CO₂-eq/Tn Km.

Tabla 7. Resultados de LCIA para el GWP de acuerdo con el IPCC 2013.

Aspecto medioambiental	Materia prima	Valor del LCIA	Unidades	Nombre del conjunto de datos según la base de datos de Ecoinvent
Consumo de materias primas (IMP_p^{RM})	Amonio	2.9424	Kg CO ₂ -eq/Kg	Ammonia, partial oxidation, liquid, at plant
	Oxígeno	0.7040		Oxygen, liquid, at plant
	Ácido Sulfúrico	0.1066		Sulphuric acid, liquid, at plant
	Cianuro de hidrógeno	7.7834		Hydrogen cyanide, at plant
	Etileno	1.4547		Ethylene, average, at plant
	Propileno	1.4967		Propylene, at plant
	Ácido Clorhídrico	1.1562		Hydrochloric acid, from the reaction of hydrogen with chlorine, at plant
	Benceno	18563		Benzene, at plant
Consumo de energía (IMP^{EN})	Hidróxido de Sodio	0.9582	Kg CO ₂ -eq/MJ	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant
	-	0.0882		Heavy fuel oil, burned in refinery furnace
Transporte (IMP^{TR})	-	0.0920	Kg CO ₂ -eq/Tn Km	Transport, lorry >32t, EURO3

En este marco, se espera que la demanda aumente en Leuna y Neratovice, por lo que el problema consiste en determinar si es mejor expandir la capacidad de la planta existente o abrir una nueva en Neratovice, que estaría cerca de los mercados en crecimiento.

4. Método de resolución

El programa que se ha utilizado para modelar la cadena de suministro y resolver el problema de optimización multiobjetivo es GAMS (*General Algebraic Modeling System*), un sistema que es ampliamente utilizado en el diseño y optimización de redes o superestructuras [11]. Una de las principales ventajas de GAMS es que permite formular problemas de optimización con una notación similar a la notación matemática y construir modelos complejos que pueden ser adaptados a nuevas situaciones rápidamente. El *solver* que se ha utilizado para resolver el problema ha sido CPLEX 12.1.0, y los resultados obtenidos han sido posteriormente procesados con MATLAB usando como apoyo las utilidades GDXMRW para importar y exportar datos entre GAMS y MATLAB.

4.1. Generación de escenarios

El problema objeto de estudio es un problema estocástico (depende del azar), ya que posee un parámetro incierto (el precio de los derechos de emisión de CO₂). Por este motivo, éste no puede ser resuelto para un solo escenario de precio (el valor nominal o medio), sino que tiene que ser resuelto para un conjunto de escenarios de precio aleatorios que tendrán asociada una cierta probabilidad de ocurrencia. De esta manera, se conseguirá un modelo robusto y que incluye la fuente de incertidumbre.

La generación de escenarios se ha realizado en MATLAB. Partiendo de un valor elegido de la desviación estándar y de los valores estimados del precio de los derechos de emisión de CO₂ o EUAs (*European Union Allowances*) en los próximos diez años, se ha generado un conjunto de datos de EUAs de carácter aleatorio y que siguen una distribución normal de probabilidad.

4.2. Estimación de la desviación estándar

Los valores de la desviación estándar y la media son imprescindibles para generar una distribución normal de probabilidad. Sin embargo, no se han encontrado fuentes bibliográficas que hagan referencia a valores de desviación estándar de los datos

estimados del precio de los derechos de emisión de CO₂ a largo plazo, por lo que dicho valor ha sido calculado en base a datos históricos.

Los registros de datos históricos del precio de los derechos de emisión de CO₂ desde 2012 hasta la actualidad se han obtenido de las bases de datos del EEX (*European Energy Exchange*). De este modo, se ha creado en MATLAB una distribución normal de probabilidad con los datos históricos y a partir de la distribución, se ha obtenido el valor medio de precio y su desviación estándar. Los valores obtenidos de desviación estándar oscilan entre 0.7442 y 0.2358. Un ejemplo de cálculo de la desviación estándar y media a partir de datos históricos y considerando que siguen una distribución normal de probabilidad, se muestra en la Figura 4.

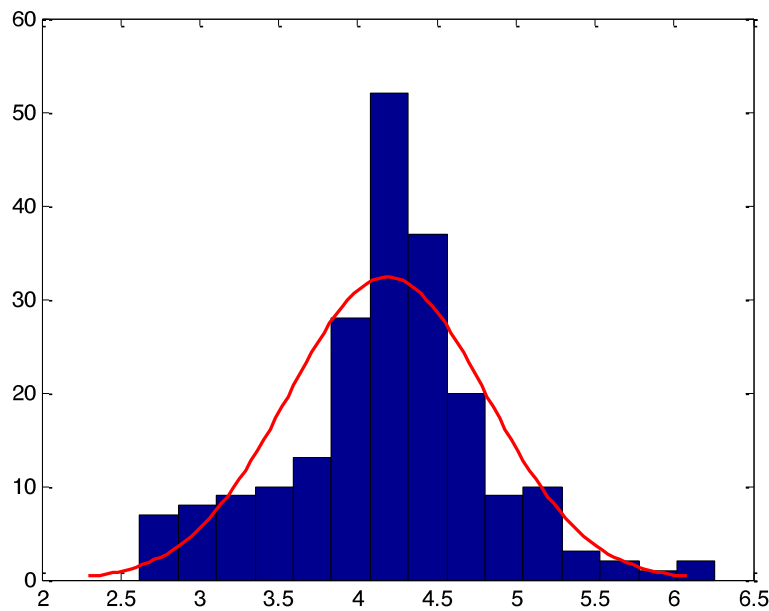


Figura 4. Distribución normal de probabilidad generada para el cálculo de la desviación estándar en el caso del año 2013. Los parámetros obtenidos para este caso son: $\mu=4.1874$; $\sigma=0.6309$.

4.3. Método de resolución: Sample Average Approximation

La resolución del modelo MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) anteriormente descrito en el apartado 2, se realiza siguiendo una estrategia de descomposición basada en el algoritmo de *Sample Average Approximation*, donde la distribución de probabilidad es aproximada por un conjunto de escenarios discretos [12]. Este

algoritmo se caracteriza por realizar el cálculo de dos modelos y resolverlos de forma iterativa en dos pasos, tal y como se muestra en la Figura 5.

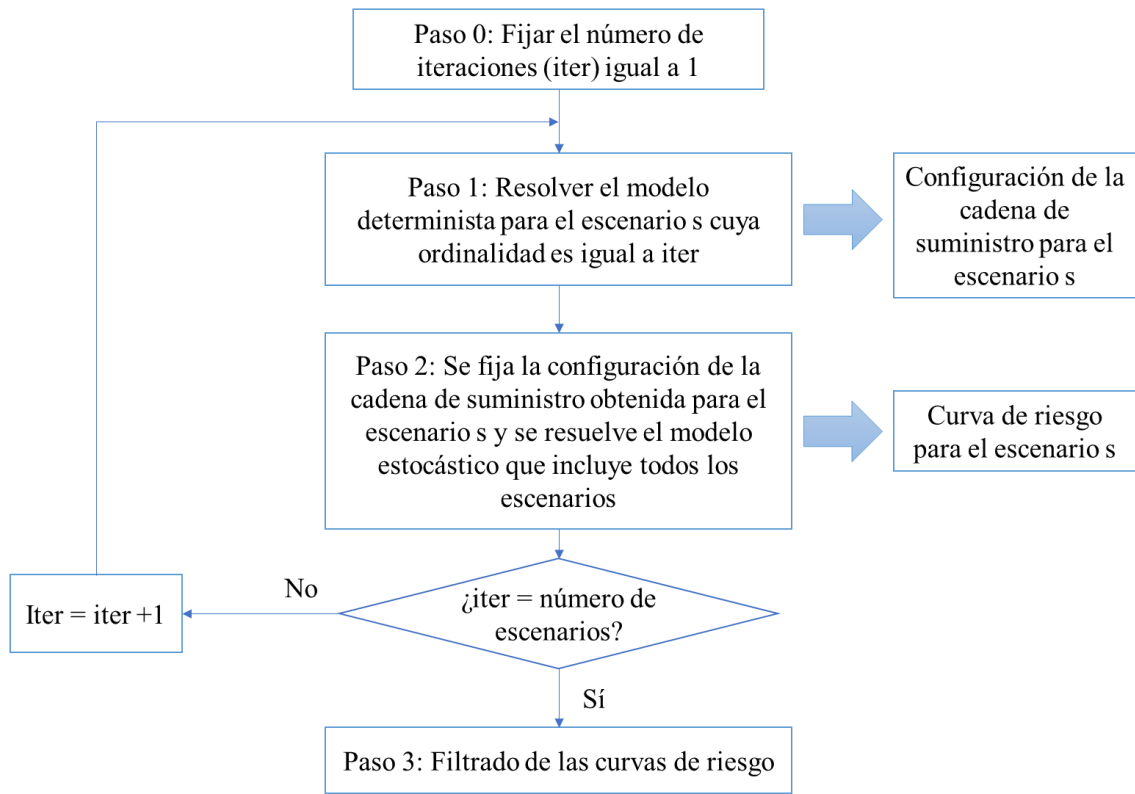


Figura 5. Esquema de resolución que sigue el algoritmo de aproximación a la media de la muestra.

Como se puede observar en la Figura 5, en el primer paso del algoritmo se resuelve un modelo determinista, que sólo tiene en cuenta un escenario (se elimina la incertidumbre). En este paso se obtiene el valor de las variables estructurales y operacionales para el escenario escogido, es decir, la configuración de la cadena de suministro para dicho escenario.

En el segundo paso, se fija el valor de las variables estructurales (variables que no dependen del escenario) de acuerdo con los resultados obtenidos en el primer paso, es decir, se trabaja con la configuración de la cadena de suministro obtenida en el paso anterior. De esta forma, se resuelve el modelo estocástico que incluye todos los escenarios maximizando el valor esperado del NPV [13]. Cuando el proceso se ha completado para el escenario elegido, se obtiene un histograma con la distribución de

probabilidad de valores de NPV para cada uno de los escenarios del problema estocástico [14].

Este proceso de dos pasos se repite hasta que no quedan escenarios por explorar [15]. Al final se obtiene un gráfico que recoge un conjunto de curvas de riesgo, resultado de calcular el área acumulada bajo la curva de distribución de cada uno de los escenarios o configuraciones [16].

El conjunto de curvas de riesgo que se genera al finalizar el proceso de resolución recoge un número de curvas igual al número de escenarios explorados, aunque algunas de ellas están dominadas por otras. Por este motivo, es necesario filtrar las curvas de riesgo.

El proceso de filtrado descarta aquellas curvas que están dominadas por al menos otra curva. Una solución A está dominada por otra solución B cuando su curva de riesgo se encuentra enteramente por encima de la B, esto implica que, para cualquier nivel de probabilidad, la solución A conducirá siempre a menores beneficios que la solución B. En otras palabras, la solución B será mejor considerando todo el rango de niveles de probabilidad. El responsable de tomar la decisión final del diseño de la cadena de suministro podrá elegir de entre un conjunto reducido de curvas de riesgo no dominadas cuál es la que más se ajusta a sus preferencias [17].

Las curvas de riesgo no dominadas más significativas del problema, las cuáles han de ser consideradas por el responsable de la toma de decisiones son la curva orientada hacia el riesgo, y la curva con aversión al riesgo. En primer lugar, la identificación de cada una se ilustrará mediante un ejemplo.

En la Figura 6 se muestra una curva de riesgo cuyo $E[NPV]$ es igual a 3.5088×10^9 \$ y con una probabilidad de no superar ese valor del 73%. Para identificar la curva orientada hacia el riesgo, y la curva con aversión al riesgo se puede recurrir a métricas del riesgo como lo son el *Value at risk* (VaR) y el *Opportunity value* (OV).

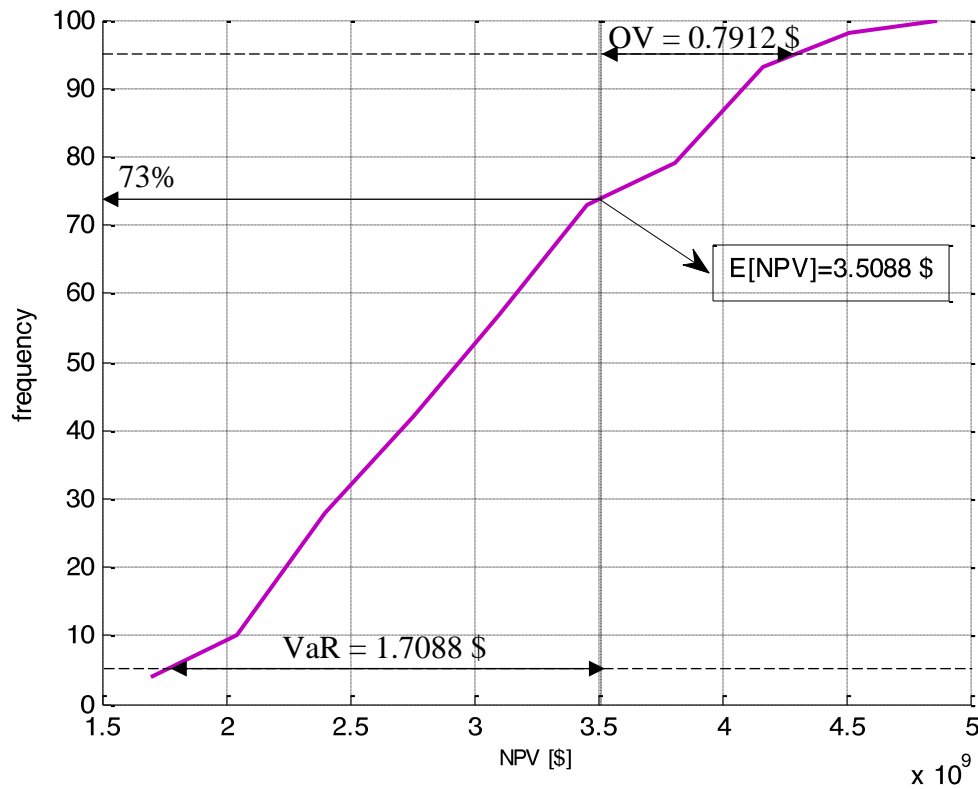


Figura 6. Ejemplo de cálculo de VaR y OV.

El *Value at risk* (VaR) se define como la diferencia entre el $E[NPV]$ de la curva de riesgo y el valor del NPV que se corresponda con cierto nivel de riesgo. En este trabajo, este nivel de riesgo se fija en el 5%. La medida opuesta del riesgo es el *Opportunity value* (OV) [18] que se corresponde con la diferencia entre el NPV al 95% de riesgo y el valor de $E[NPV]$ de dicha curva. En la Figura 6 se presenta el cálculo de VaR y OV.

De este modo, la curva de riesgo con el mayor valor de OV será la curva orientada hacia el riesgo, y aquella curva con el menor valor de VaR será la curva con aversión al riesgo. Este es el criterio que se utiliza en el Apartado 5 para identificar la curva orientada al riesgo y la curva con aversión al riesgo dentro del conjunto de curvas no dominadas obtenido tras la resolución del problema.

5. Resultados y Conclusiones

Antes de estudiar la influencia del valor de la desviación estándar en la configuración final de la cadena de suministro y los beneficios que ésta retribuye, se decide evaluar cómo influye el número de escenarios en los resultados y se tratará de encontrar el

número óptimo. El estudio de la influencia del número de escenarios viene motivado por el hecho de que está ampliamente demostrado que el tamaño de la muestra influye directamente en el valor de la función objetivo obtenido al resolver el problema de optimización [19]. Tanto es así, que incluso se ha llegado a estudiar el caso en el que el tamaño de la muestra varía en cada iteración del algoritmo de resolución, mejorando de esta forma el rendimiento del algoritmo [20].

5.1. Influencia del número de escenarios en la configuración de la cadena de suministro

Para estudiar la influencia del tamaño de la muestra en los resultados se resolverá el problema de optimización manteniendo el valor de los distintos parámetros constante, variando únicamente el número de escenarios entre cada caso de estudio. Así, se trabaja con el valor medio de todos los datos de desviación estándar obtenidos, es decir, $\sigma = 0.61$. En cuanto al valor porcentual de disminución del límite de emisiones libres de CO₂, se establece en el 10%. Finalmente, el horizonte de tiempo se fija en 12 años. Se decide realizar el estudio resolviendo el problema de optimización para 50 y 100 escenarios.

5.1.2. Resolución con 50 escenarios

En primer lugar, el problema de optimización se resuelve con un tamaño de muestra de 50 escenarios, obteniéndose 7 soluciones que no están dominadas por otras, tal y como se observa en la Figura 7.

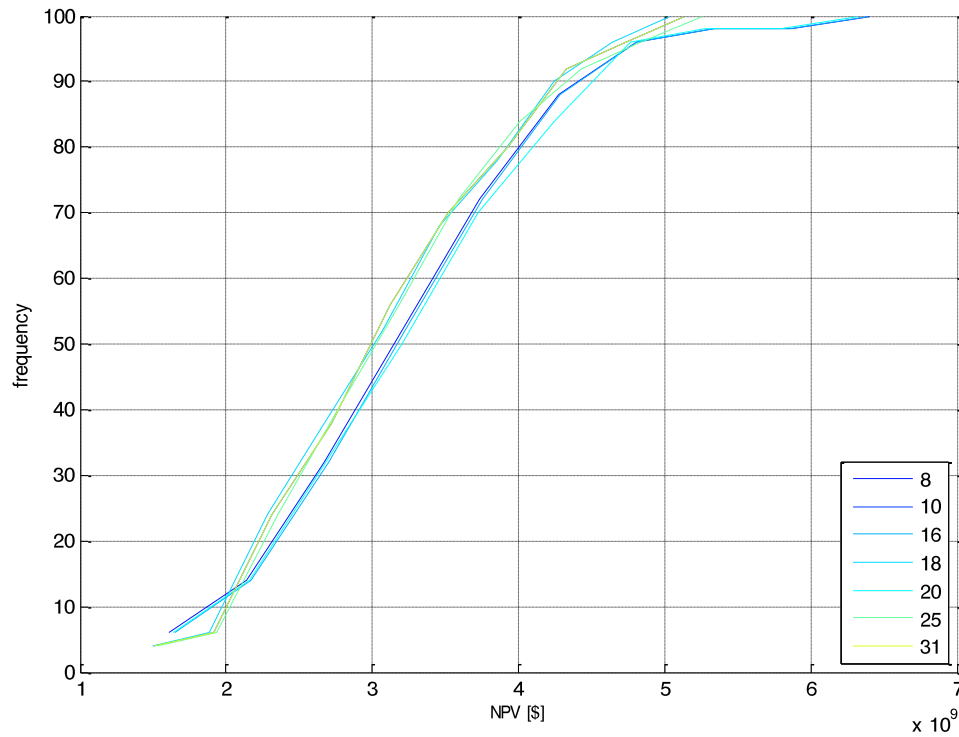


Figura 7. Curvas de riesgo obtenidas para la resolución con 50 escenarios y desviación estándar $\sigma = 0.61$.

Los valores esperados del NPV asociados a las 7 soluciones válidas obtenidas son los que se recogen en la Tabla 8, junto con los valores del *Value at risk* (VaR) y el *Opportunity value* (OV) de cada curva de riesgo.

Tabla 8: Valor esperado del NPV obtenido para cada uno de los escenarios con resultados válidos en la resolución con 50 escenarios y métricas de riesgo asociadas.

Escenario	E[NPV] ($\times 10^9$ \$)	VaR ($\times 10^9$ \$)	OV ($\times 10^9$ \$)
8	3.4725	1.8225	1.2775
10	3.2616	1.6116	1.3384
16	3.4817	1.9317	1.2683
18	3.2400	1.6400	1.3600
20	3.4684	1.8684	1.2316
25	3.2862	1.6362	1.4638
31	3.2618	1.5618	1.3382

Si se analizan los valores de la Tabla 8, se podría decir que el escenario que consigue el valor esperado máximo del NPV es el escenario 16. En cuanto a las curvas de riesgo características, la curva orientada al riesgo es la que se corresponde con el escenario 25, ya que tiene el valor de OV más alto; y la curva con aversión al riesgo es la que se corresponde con el escenario 31, debido a que tiene el valor más bajo de VaR.

En la Figura 8 se recogen las curvas de riesgo características para la resolución con 50 escenarios. Además, se incluye la curva de riesgo de la solución determinista, es decir, la que se obtiene al resolver el problema para el valor promedio del parámetro incierto.

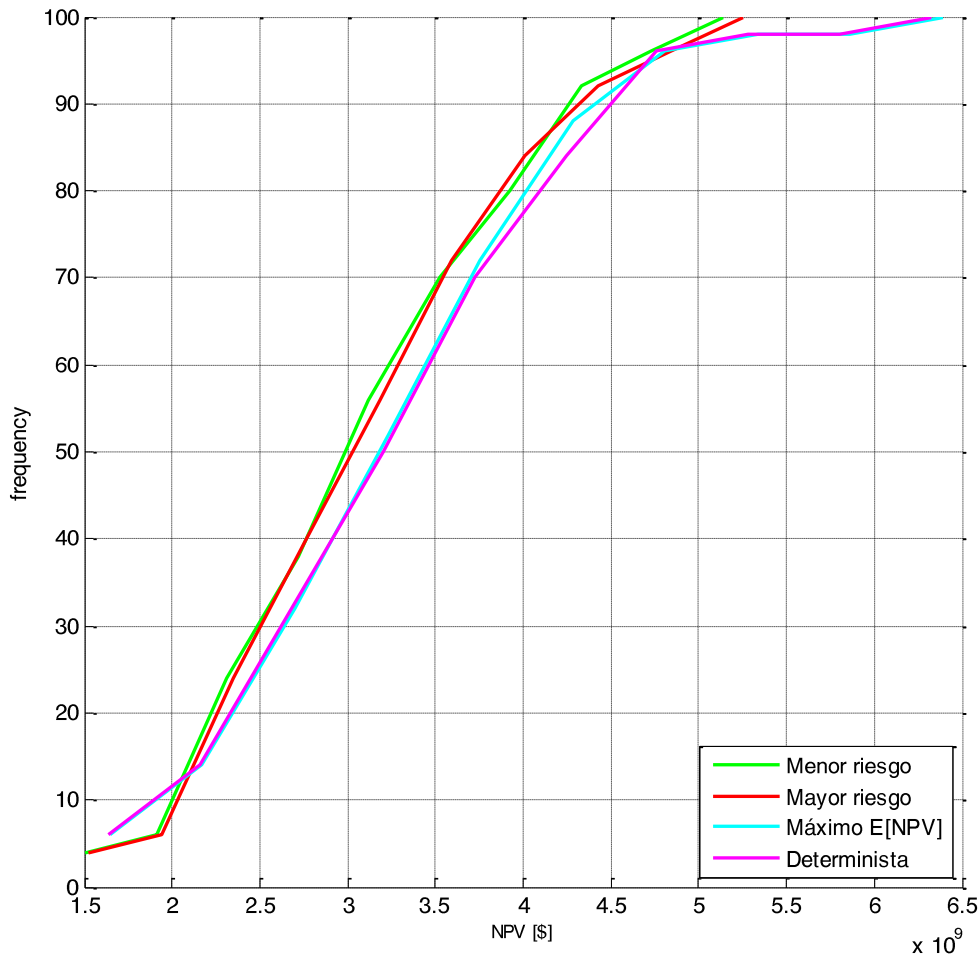


Figura 8. Curvas de riesgo más representativas del problema resuelto con 50 escenarios y desviación estándar $\sigma = 0.61$.

Como se puede apreciar en la Figura 8, las curvas asociadas al mayor y menor riesgo tienen un recorrido prácticamente idéntico; al igual que sucede con la curva de riesgo de máximo $E[NPV]$ y la que se corresponde con la solución determinista.

Cabe destacar que la curva de riesgo de máximo $E[NPV]$ alcanza mayores valores de NPV que la curva orientada al riesgo, esto se debe a que el valor esperado del NPV de la curva orientada al riesgo es muy pequeño (3.2862×10^9 \$) comparado con el de la curva de máximo $E[NPV]$ (3.4817×10^9 \$), lo que implica que la diferencia de dicho valor con el valor de NPV que se alcanza al 95% de probabilidad sea el más alto. De hecho, si se tomará un valor de probabilidad superior al 95% para calcular el valor del OV, posiblemente la curva de riesgo que lleva asociado el valor esperado de NPV máximo también sería la curva orientada al riesgo.

Normalmente, la configuración que conlleva menos riesgo (3.2618×10^9 \$) suele llevar asociado un valor esperado del NPV mayor que el que lleva asociado la configuración con más riesgo (3.2862×10^9 \$) pero este hecho generalizado no se cumple en este caso. Esto se debe a que las curvas de mayor y menor riesgo se cruzan en valores de NPV muy bajos, cuando normalmente deberían cruzarse en valores NPV muy altos.

Por tanto, en este caso, el responsable de la toma de decisiones podría escoger fácilmente la mejor configuración para la cadena de suministro, ya que la curva de riesgo que se corresponde con el máximo valor esperado de NPV, además de tener asociadas las máximas ganancias promedio, esta configuración le permitiría alcanzar los valores de NPV más altos, aunque con poca probabilidad de ocurrencia.

La configuración de la cadena de suministro que se corresponde con el escenario 16 y con la curva de riesgo que alcanza un valor esperado del NPV máximo al final del horizonte de tiempo es la que se muestra en la Figura 9.

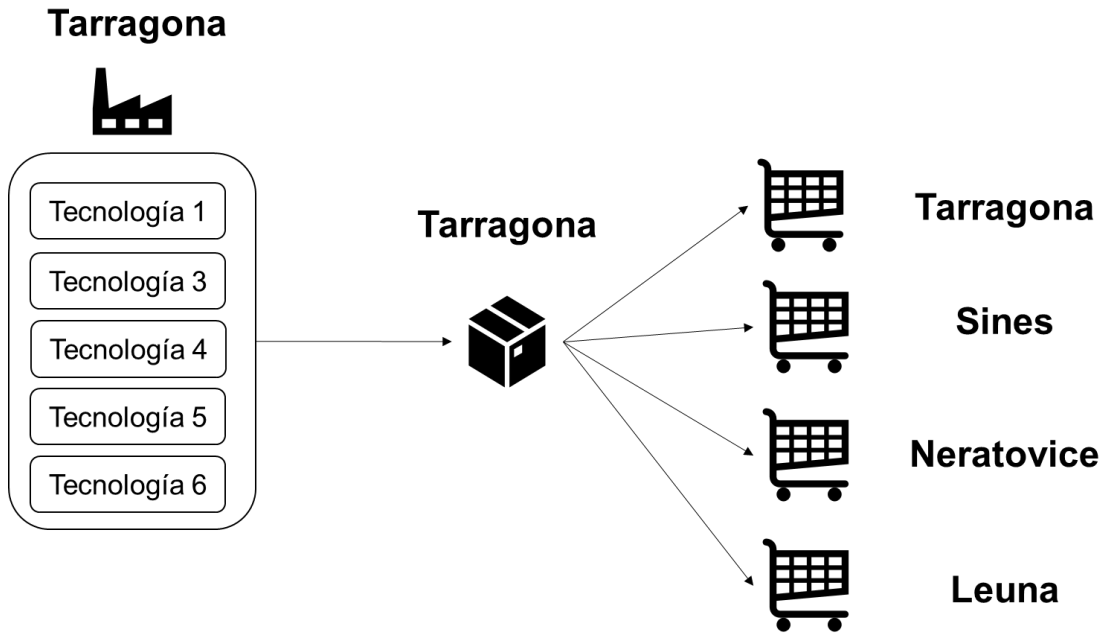


Figura 9. Configuración de la cadena de suministro resuelta con 50 escenarios para el caso del valor esperado de NPV máximo.

Por tanto, para el caso del valor esperado de NPV máximo, no se instalarán la planta ni el almacén en Neratovice, por el contrario, se explotarán 5 tecnologías distintas en la planta existente de Tarragona.

5.1.3. Resolución con 100 escenarios

A continuación, se resuelve el problema de optimización con un tamaño de muestra igual a 100 escenarios. En este caso se obtiene una única curva de riesgo acumulada que no está dominada correspondiente al escenario 23, tal y como se muestra en la Figura 10.

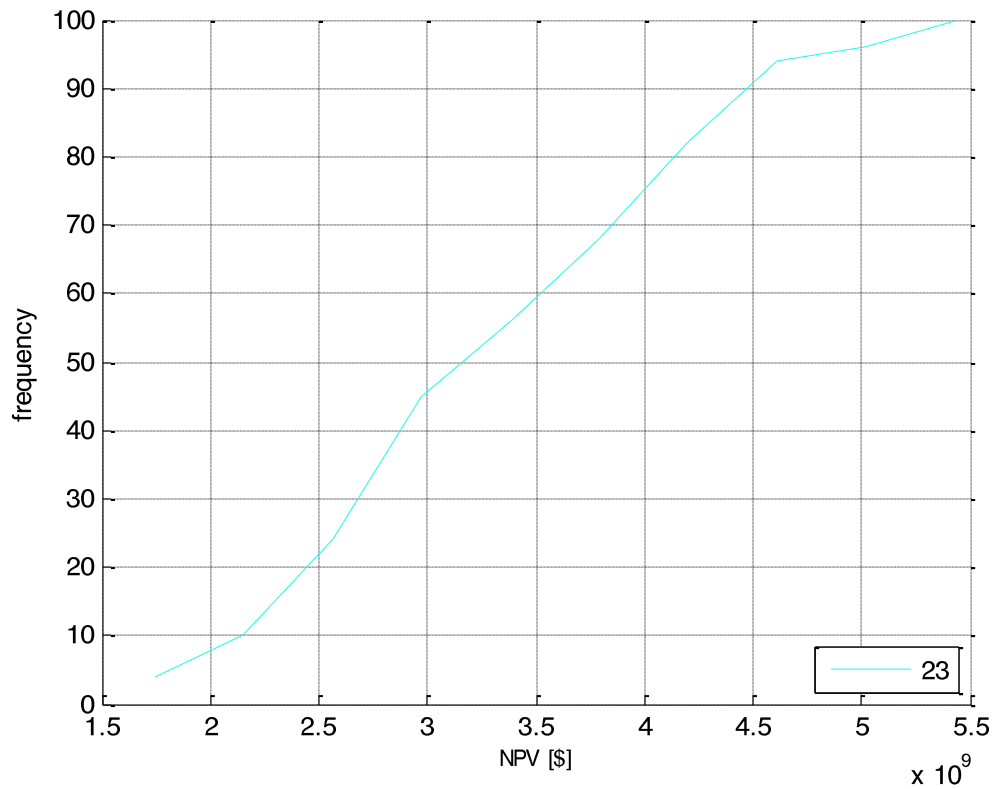


Figura 10. Curva de riesgo obtenida para la resolución con 100 escenarios y desviación estándar $\sigma = 0.61$.

El valor esperado de NPV de la única solución válida obtenida es 3.4552×10^9 \$ y las métricas de riesgo asociadas a la misma son, un valor de VaR igual a 1.6552×10^9 \$ y un valor de OV igual a 1.3248×10^9 \$.

En la Figura 11 se representan la curva de riesgo no dominada y la curva de riesgo asociada la solución determinista.

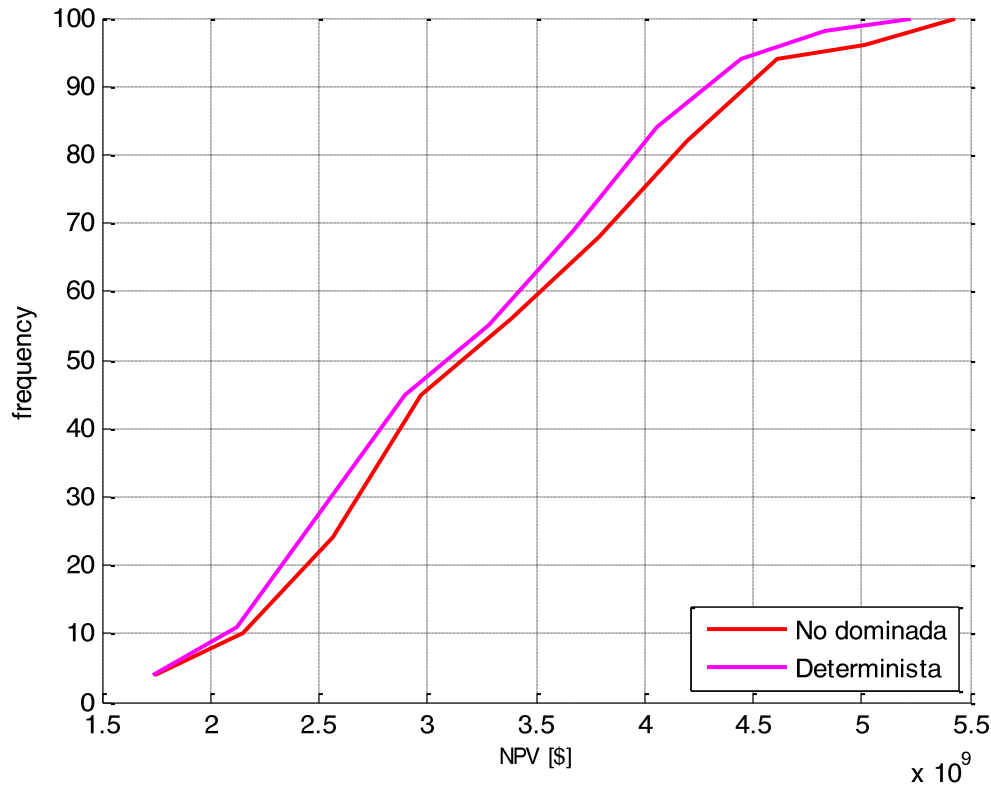


Figura 11. Curvas de riesgo más representativas del problema resuelto con 100 escenarios y desviación estándar $\sigma = 0.61$.

Como se puede observar en la Figura 11, con la curva de riesgo no dominada se pueden llegar a alcanzar valores de NPV más altos que con la curva de riesgo determinista, y además, la probabilidad de no alcanzar cualquier valor de NPV concreto es menor para el caso de la curva de riesgo no dominada. Esto se debe a que la curva de riesgo determinista está dominada por la otra. Por tanto se podría decir que, al resolver con 100 escenarios, no se le proporciona al responsable de la toma de decisiones un conjunto de opciones de diseño entre la que escoger la más afín a su criterio, sino que se le proporciona un único diseño que es mejor que el que se obtendría sin tener en cuenta la incertidumbre en el precio de los derechos de emisión de CO₂.

La configuración de la cadena de suministro al final del horizonte de tiempo que se corresponde con la curva de riesgo no dominada es la que se muestra en la Figura 12.

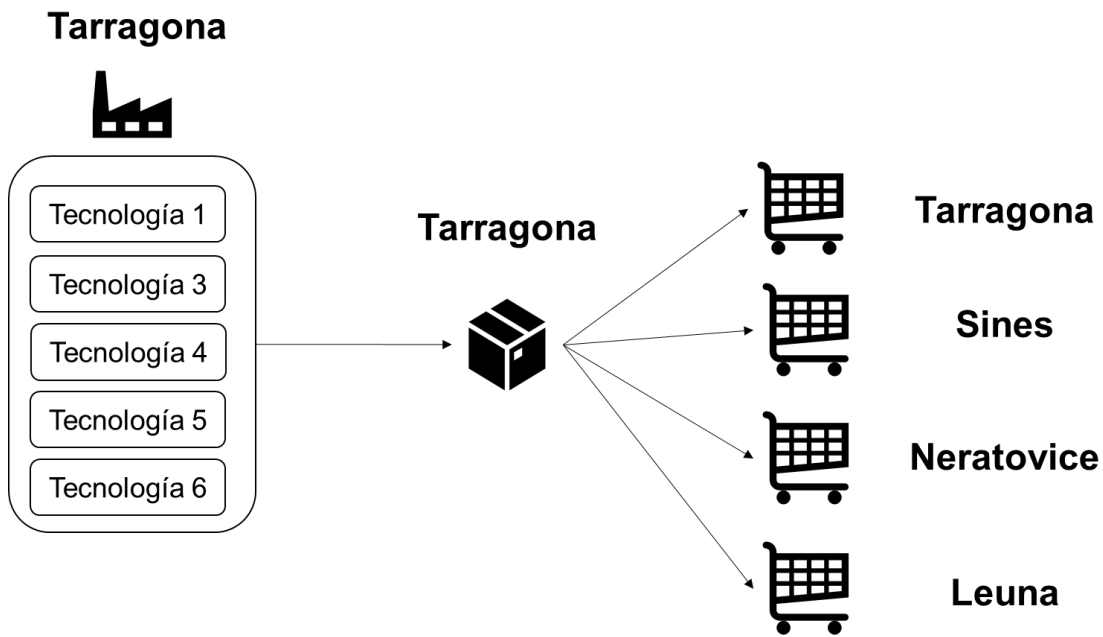


Figura 12. Configuración de la cadena de suministro resuelta con 100 escenarios para el caso del escenario orientado al riesgo.

Por tanto, para la configuración de la cadena de suministro escogida, no se instalarán la planta de producción ni el almacén en Neratovice, si no que se explotarán 5 tecnologías diferentes (la 1, 3, 4, 5 y 6) en la planta existente de Tarragona, tal y como sucedía en el caso estudiado anteriormente.

5.1.4. Comparación de los resultados obtenidos al resolver el problema de optimización con un número de escenarios diferente

En este apartado se realiza una comparación entre los resultados obtenidos al resolver el problema de optimización con diferente número de escenarios. En la Tabla 9 se recogen los valores esperados del NPV de cada una de las curvas de riesgo características obtenidas tras resolver el problema con diferente número de escenarios.

Tabla 9. Valores de E[NPV] y métricas de riesgo obtenidos tras resolver el problema de optimización con 50 y 100 escenarios.

Número de escenarios	E[NPV] Curva Mayor Riesgo ($\times 10^9$ \$)	E[NPV] Curva Menor Riesgo ($\times 10^9$ \$)	E[NPV] Máximo ($\times 10^9$ \$)
50	3.2862	3.2618	3.4817
100	-	-	3.4552

Como se puede observar en la Tabla 9, se obtienen valores muy similares del valor esperado de NPV para la resolución con 50 y 100 escenarios. Sin embargo, para el caso resuelto con 50 escenarios se obtiene un valor esperado de NPV ligeramente más alto que el obtenido para la curva de riesgo no dominada de la resolución con 100 escenarios.

Finalmente, se ha obtenido la misma configuración de la cadena de suministro para la mejor solución de los dos casos, lo que indica que el número de escenarios utilizado para resolver no afecta a las decisiones estructurales, si no que afecta a aquellas relacionadas con la planificación.

En conclusión, si el objetivo del problema de optimización fuese conocer la configuración de la cadena de suministro, independientemente del valor de los flujos de producto, podría resolverse el problema con un tamaño reducido de muestra, como podría ser 5 escenarios. Sin embargo, si se desea conocer el valor de las variables que se ven afectadas por la incertidumbre (decisiones de planificación) sería necesario ampliar el tamaño de muestra.

En el caso en el que los valores de desviación estándar sean extremos (muy altos o muy bajos), un buen tamaño de muestra para resolver el problema teniendo en cuenta las decisiones estructurales y de planificación es 50 escenarios, ya que permite alcanzar valores esperados de NPV muy similares a los que se alcanzan con 100 escenarios, pero con la ventaja de obtener curvas de riesgo que se cruzan para poder estudiar distintas alternativas de configuración. Además, al resolver el problema de optimización con 50 escenarios el tiempo de resolución del algoritmo se reduce de 90 minutos a 30 minutos.

5.2. Influencia de la desviación estándar del precio de los derechos de emisión de CO₂ en la configuración de la cadena de suministro

Una vez se conoce cómo afecta el número de escenarios a la configuración de la cadena de suministro, y cuál es el valor más acertado para resolver el problema caso de estudio se puede estudiar la influencia de la desviación estándar del precio de los derechos de emisión de CO₂ en la configuración de la cadena de suministro. El número de escenarios que se utiliza para realizar el presente estudio es 50 escenarios.

Es importante conocer la influencia de la desviación estándar del precio de los derechos de emisión de CO₂ en la configuración de la cadena de suministro y su operabilidad porque la fiabilidad de los datos estimados de precio en base a los que se toman las decisiones varían en función del escenario. Por ejemplo, los datos estimados a largo plazo tendrán una desviación estándar mayor que aquellos estimados a corto plazo o los datos estimados en un periodo de subasta de derechos de emisión tendrán una mayor desviación estándar que los estimados durante un periodo de explotación.

En este apartado se estudia la influencia de la desviación estándar en la resolución del problema de diseño mediante la evaluación de dos casos, un caso con una alta desviación estándar y otro con una baja desviación estándar. Los valores de la desviación estándar a evaluar son los valores máximos y mínimos obtenidos en el cálculo de la desviación estándar que se explica en el Apartado 4.2.1, 0.7442 y 0.2358 respectivamente.

5.2.1. Influencia de valores altos de la desviación estándar en la configuración de la cadena de suministro

En primer lugar, se estudia cómo afecta resolver el problema de diseño con una alta volatilidad en los datos de precio de los derechos de emisión de CO₂. El valor de la desviación estándar utilizado en este caso es 0.7442, y con él se obtienen 9 curvas de riesgo que no están dominadas, tal y como se muestra en la Figura 13.

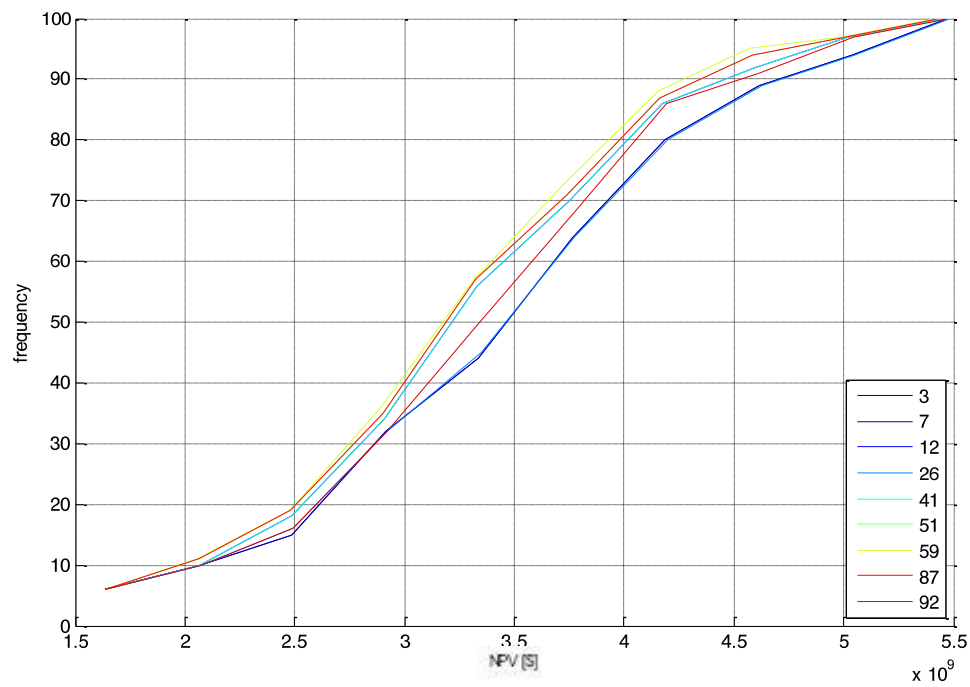


Figura 13. Curvas de riesgo obtenidas para la resolución con una desviación estándar igual a 0.7442 y 50 escenarios.

Los valores del NPV esperado asociados a las 9 soluciones válidas obtenidas, son los que se recogen en la Tabla 10:

Tabla 10. Valor esperado de NPV obtenido para cada uno de los escenarios con resultados válidos en la resolución con una desviación estándar igual a 0.7442, 50 escenarios y las métricas de riesgo asociadas.

Escenario	E[NPV] ($\times 10^9$ \$)	VaR ($\times 10^9$ \$)	OV ($\times 10^9$ \$)
15	3.4756	1.6756	1.3244
17	3.6498	1.8498	1.6302
20	3.5758	1.7258	1.6242
28	3.6249	1.7749	1.6251
29	3.7035	1.9535	1.5465
31	3.7193	2.1193	1.6307
36	3.6001	1.8001	1.6499
38	3.7192	2.1192	1.6808
49	3.5632	1.7132	2.0868

El escenario que consigue alcanzar el valor esperado de NPV máximo es el escenario 31, tal y como se puede observar en la Tabla 10. En cuanto a las curvas de riesgo más características, atendiendo a las métricas de riesgo, se podría decir que la curva asociada al escenario 49 se corresponde con la curva orientada al riesgo, y la curva asociada al escenario 15 con la curva con aversión al riesgo.

Estas tres curvas de riesgo identificadas junto con la curva de riesgo asociada a la solución determinista se recogen en la Figura 14.

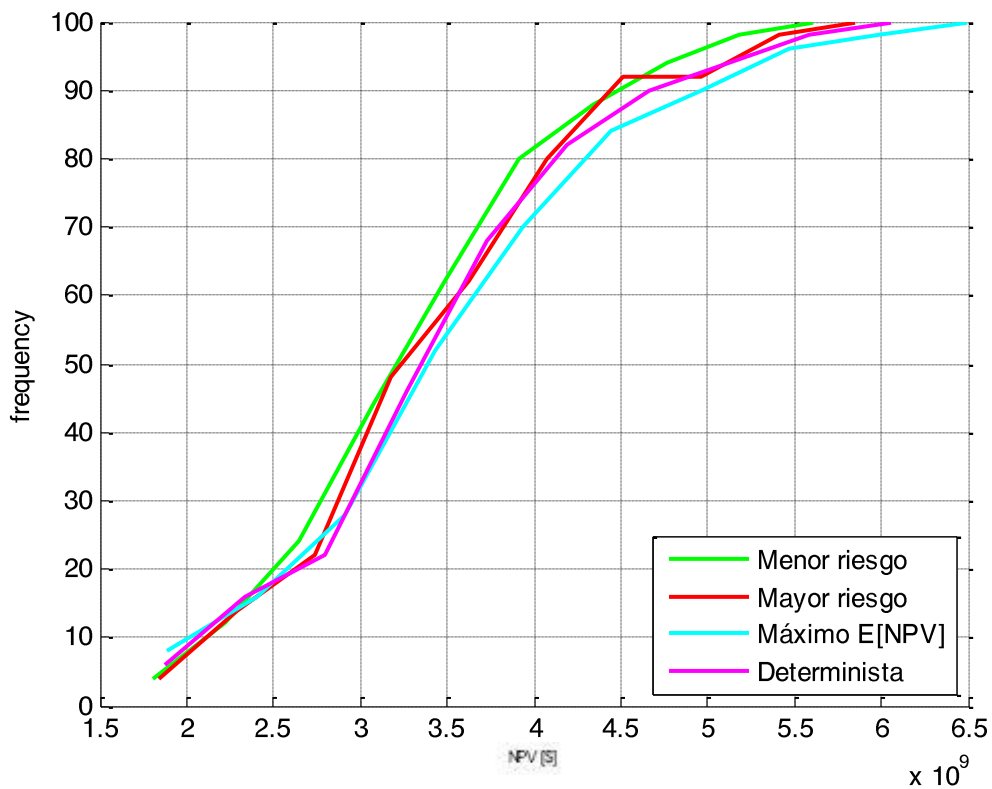


Figura 14. Curvas de riesgo más representativas del problema resuelto con una desviación estándar igual a 0.7442 y 50 escenarios.

Como se puede observar en la Figura 14, la curva de menor riesgo y mayor riesgo se cruzan en varios puntos de su trazado, esto, junto con el hecho de que prácticamente parten y acaban del mismo punto, hacen que las curvas sean muy similares y justifica que la curva con aversión al riesgo tenga un valor esperado de NPV (3.4756×10^9 \$) menor que el de la curva orientada al riesgo (3.5632×10^9 \$).

Es interesante señalar que la curva con el valor esperado de NPV máximo es también la curva capaz de alcanzar los valores de NPV más altos, y que incluso obtiene las

probabilidades más bajas de no conseguir NPV altos, ya que a partir de la mitad del gráfico, esta curva domina al resto.

Finalmente, y como cabía esperar, la curva de riesgo asociada a la solución determinista se encuentra situada entre el resto de curvas, aunque es capaz de alcanzar valores más altos de NPV que las curvas con mayor y menor riesgo.

De esta forma, la curva que más beneficios aportaría en la toma de decisiones sería la correspondiente al valor esperado de NPV máximo, cuya configuración de la cadena de suministro se corresponde con la recogida en la Figura 15.

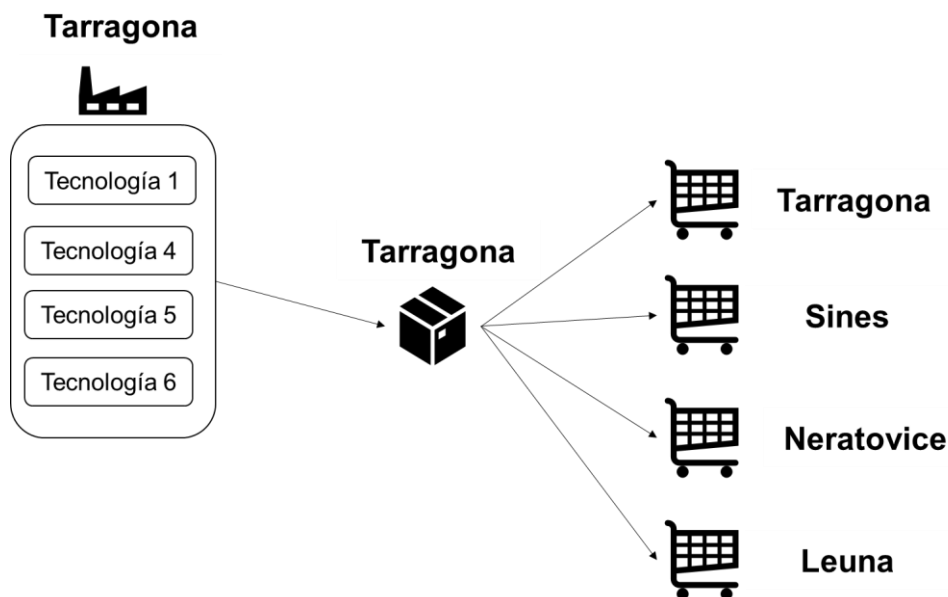


Figura 15. Configuración de la cadena de suministro resuelta con una desviación estándar igual a 0.7442 y 50 escenarios.

Cuando se resuelve el problema con valores altos de la desviación estándar, la configuración de la cadena de suministro se caracteriza por explotar 4 tecnologías en su planta de producción de Tarragona; la tecnología 4, la tecnología 5, la tecnología 6 y la tecnología 1. Y, además, por utilizar un único almacén, también en Tarragona.

Esta configuración apuesta por ampliar la capacidad de sus instalaciones iniciales en lugar de construir nuevas y establecer nuevas conexiones de transporte ya que, tras realizar la expansión de capacidad de la producción en la planta de Tarragona se logra abastecer la demanda sin necesidad de invertir en un nuevo almacén o planta.

Además, dado el bajo precio del transporte (0.4 cent/Tn Km) y la baja contribución del transporte al calentamiento global ($IMP^{TR} = 0.0920 \text{ Kg CO}_2\text{-eq/TnKm}$), es más rentable tanto desde el punto de vista económico como desde el medioambiental, abastecer a todos los mercados desde Tarragona.

En cuanto a las tecnologías de producción, cabe señalar que la únicas que no se explotan son la tecnología 2 y tecnología 3, esto se debe a que los productos finales que se producen a través de estas tecnologías son los más baratos en el mercado, y a que las materias primas necesarias para producirlos son las que más contribuyen al calentamiento global. Así, dada la alta incertidumbre en el precio de los derechos de emisión de CO₂ de este caso de estudio, conviene evitar explotar tecnologías con un alto coste medioambiental.

5.2.2. Influencia de valores bajos de la desviación estándar en la configuración de la cadena de suministro

Finalmente se estudia cómo afecta resolver el problema de diseño con una baja desviación estándar en el precio de los derechos de emisión de CO₂. El valor de la desviación estándar utilizado en este caso es 0.2358, y con él se obtienen 3 curvas de riesgo que no están dominadas. A pesar de obtenerse 3 curvas de riesgo claramente diferenciadas, éstas siguen recorridos muy similares y tienen valores medios del NPV muy parecidos, dada la baja desviación estándar de los datos con los que se resuelve el problema. Las 3 curvas de riesgo que se obtienen al resolver el caso de estudio son la que se recogen en la Figura 15.

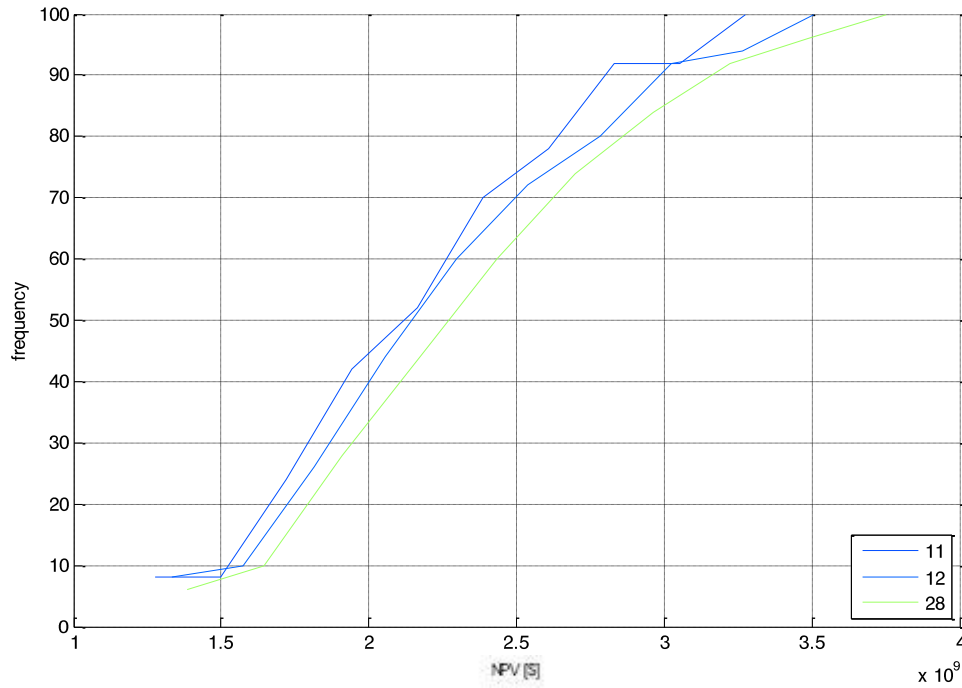


Figura 15. Curvas de riesgo obtenidas para la resolución con una desviación estándar igual a 0.2358 y 50 escenarios.

Los valores esperados del NPV asociados a las 3 soluciones válidas obtenidas, son los que se recogen en la Tabla 11:

Tabla 11: Valor del NPV esperado obtenido para cada uno de los escenarios con resultados válidos en la resolución con una desviación estándar igual a 0.2358, 50 escenarios y las métricas de riesgo asociadas.

Escenario	E[NPV] ($\times 10^9$ \$)	VaR ($\times 10^9$ \$)	OV ($\times 10^9$ \$)
11	2.2278	1.1278	0.9222
12	2.3432	1.3432	0.9568
28	2.4517	1.0517	1.0283

El escenario con el que se consigue el valor esperado de NPV máximo es 28, tal y como se puede observar en la Tabla 11. Además, este escenario tiene asociado el valor de VaR más bajo y el valor de OV más alto, lo que conlleva que también sea el escenario asociado a la curva orientada al riesgo y la curva con aversión al riesgo, lo cual, es poco común.

La curva de riesgo característica de esta resolución junto con la curva de riesgo asociada a la solución determinista solución se recogen en la Figura 16.

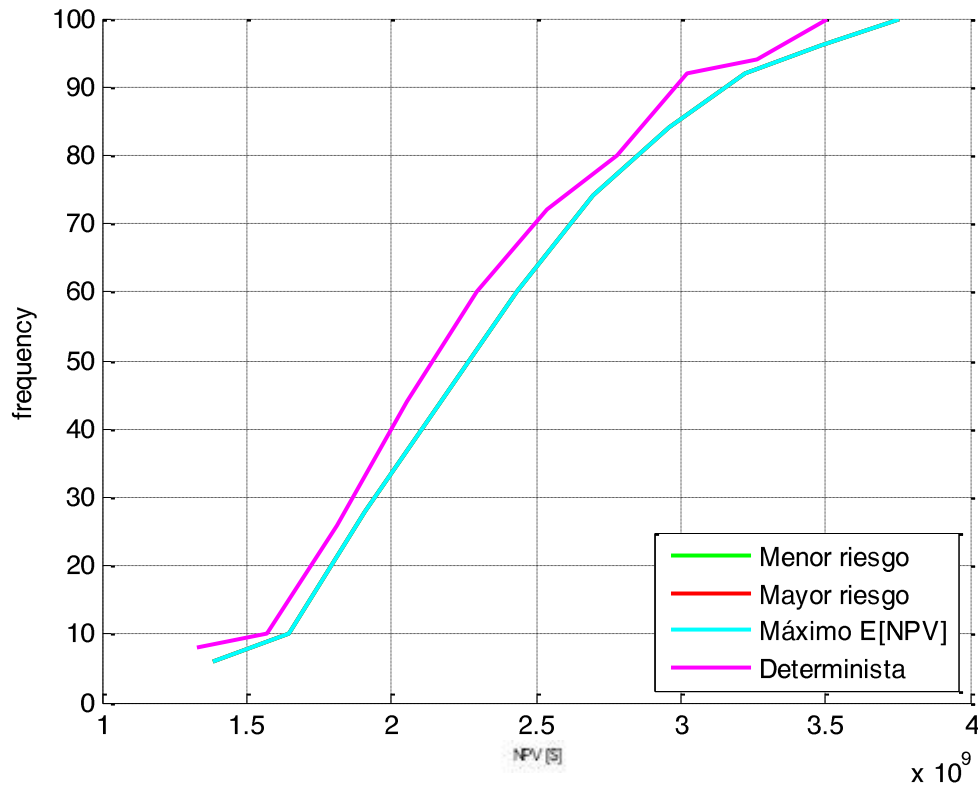


Figura 16. Curvas de riesgo más representativas del problema resuelto con una desviación estándar igual a 0.2358 y 50 escenarios.

Como se puede observar en la Figura 16, la curva de riesgo asociada a la solución determinista está dominada por la única curva característica de este caso de estudio.

La configuración de la cadena de suministro respectiva a la curva característica de este caso se presenta en la Figura 17.

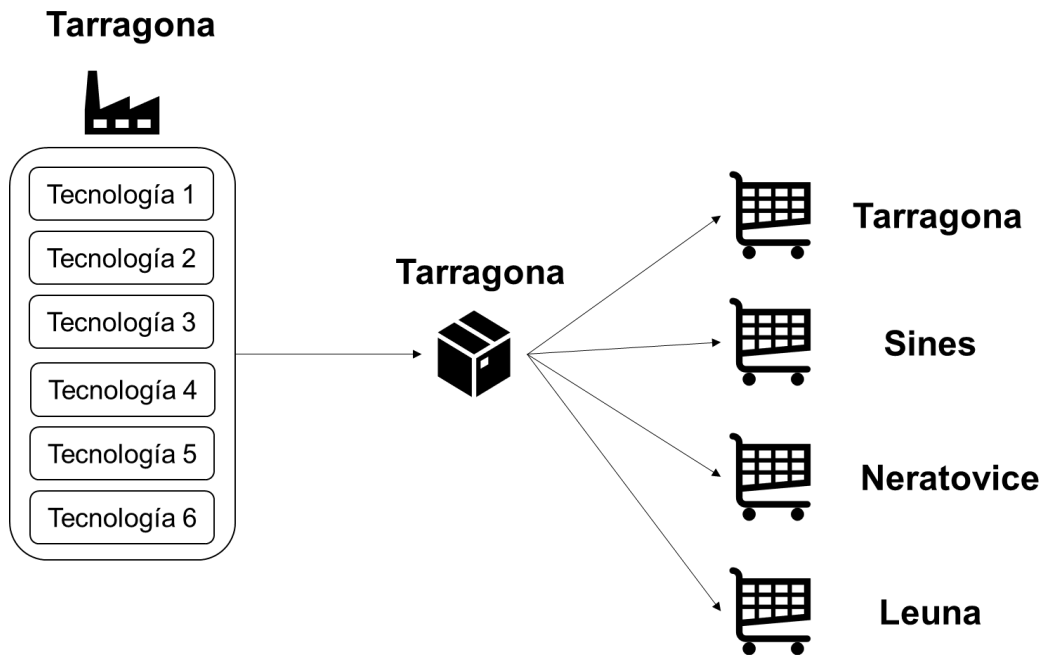


Figura 17. Configuración de la cadena de suministro resuelta con una desviación estándar igual a 0.2358 y 50 escenarios.

Como se puede observar en la Figura 17, cuando se resuelve el problema de optimización con un valor de la desviación estándar bajo, se obtiene una configuración de la cadena de suministro en la que se explotan todas las tecnologías disponibles en la planta existente de Tarragona. Además, tampoco se considera necesario instalar un segundo almacén en Neratovice. Esta configuración es la configuración más estable, y que menos tiene en consideración las posibles variaciones de precio en los derechos de emisión de CO₂, está específicamente diseñada para los valores de precio que se espera alcanzar.

Como sucedía en el caso con una alta desviación estándar, la configuración obtenida se decanta por ampliar la capacidad de sus instalaciones iniciales en lugar de construir nuevas y establecer nuevas conexiones de transporte ya que, tras realizar la expansión de capacidad de la producción en la planta de Tarragona se logra abastecer la demanda sin necesidad de invertir en un nuevo almacén o planta.

Además, dado el bajo precio del transporte (0.4 cent/Tn Km) y la baja contribución del transporte al calentamiento global ($IMP^{TR} = 0.0920$ Kg CO₂-eq/TnKm), es más rentable

tanto desde el punto de vista económico como desde el medioambiental, abastecer a todos los mercados desde Tarragona.

5.2.3. Comparación de los resultados obtenidos al resolver el problema de optimización con una alta y baja desviación estándar en el precio de los derechos de emisión de CO₂

En este apartado se realiza una comparación entre los resultados obtenidos al resolver el problema de optimización con un alta y una baja desviación estándar en el precio de los derechos de emisión de CO₂.

En primer lugar, se han recogido en la Tabla 12 los valores esperados de NPV obtenidos en los dos casos estudiados.

Tabla 12. Valores de E[NPV] obtenidos tras resolver el problema de optimización con una desviación estándar de 0.2358 y 0.7442 en el precio de los derechos de emisión de CO₂.

Desviación estándar	E[NPV] Curva Mayor Riesgo (x10 ⁹ \$)	E[NPV] Curva Menor Riesgo (x10 ⁹ \$)	E[NPV] Máximo (x10 ⁹ \$)
0.2358	2.4517	2.4517	2.4517
0.7442	3.5632	3.4756	3.7193

Como se puede observar en la Tabla 12, los valores esperados de NPV entre los que se mueven los resultados obtenidos con la resolución con una desviación estándar de 0.7442 son muy superiores a los que se obtienen con una desviación estándar de 0.2358, algo totalmente esperable, ya que valores altos de desviación estándar permiten alcanzar un mayor rango de valores esperados de NPV, pero con menor probabilidad de materializarse.

En cuanto al valor medio de NPV que se obtiene con la curva de menor riesgo en ambos casos de estudio se podría concluir que, para el problema planteado, siempre será menor que el obtenido con las curvas de más riesgo y con la de máximo NPV. Este es un hecho a destacar, ya que cabría esperar que la curva con aversión al riesgo alcanzara valores de NPV puntuales más bajos a cambio de obtener valores medios de NPV más altos. Por este motivo, se podría concluir que no es favorable decantarse por el escenario que da

lugar a la curva de menor riesgo en este caso de estudio, ya que no proporciona buenos resultados de NPV ni de NPV medio.

En relación con las configuraciones de la cadena de suministro obtenidas con cada una de las desviaciones estándar estudiadas, se podría decir que ambas configuraciones son iguales, excepto en las tecnologías de proceso que se explotan. Por tanto, independientemente de la desviación estándar, la cadena de suministro se caracterizará por tener una planta de producción y un almacén en Tarragona. Ya que, como se ha mencionado anteriormente, es más rentable tanto desde el punto de vista económico como desde el medioambiental, abastecer a todos los mercados desde Tarragona.

Por otra parte, como se observa en las Figuras 15 y 17, las tecnologías de producción que se explotan en las plantas dependen de la desviación estándar. Cuando la desviación es alta, se explotan todas las tecnologías excepto la 2 y 3, esto puede deberse a que los productos finales que se producen a través de estas tecnologías son los más baratos en el mercado, y a que las materias primas necesarias para producirlos son las que más contribuyen al calentamiento global. Sin embargo, en escenarios de baja desviación estándar en el precio de los derechos de emisión de CO₂ se explotan todas las tecnologías de producción. Cabe destacar que en ambos casos se han instalado las tecnologías 1 y 6, ya que son las que fabrican los productos finales más caros en el mercado, y cuyo coste medioambiental, en cuanto a materias primas se refiere, es el más bajo.

Finalmente, se podría concluir que cuando se cuenta con valores estimados del precio de los derechos de emisión de CO₂ a largo plazo con una baja desviación estándar, o se dan en un escenario con mucha probabilidad de ocurrencia; no merece la pena introducir la incertidumbre en el estudio de la cadena de suministro ya que los valores esperados de NPV que se obtienen con los diferentes escenarios es prácticamente el mismo. Sin embargo, para casos en los que se tienen datos con mucha desviación estándar o se atraviesa una época de incertidumbre en el precio de los derechos de emisión de CO₂, es muy conveniente introducir la incertidumbre en el diseño de la cadena de suministro, y que quede a elección del responsable de la toma de decisiones la configuración a elegir y el riesgo que está dispuesto a asumir.

6. Bibliografía

- [1] GROSSMANN, I.E. and GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. *Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes*. Computers & Chemical Engineering. 34(9): p. 1365-1376, 2010.
- [2] PUIGJANER, L. and GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. *Towards an integrated framework for supply chain management in the batch chemical process industry*. Computers and Chemical Engineering. 32(4-5): p. 650-670. 2008.
- [3] CANO-RUIZ, J. A., MCRAE, G. J. *Environmentally conscious chemical process design*. Annu. Rev. Energy Environ. 1998;23:499-536.
- [4] STERN, N. *Stern review on the economics of climate change*. London, UK: HM Treasury. 2006; Available from: <http://www.sternreview.org.uk/>.
- [5] YOUNG, T. *The beginners' guide to the UK's carbon trading schemes*. Business Green. 2008; Available from: <http://www.businessgreen.com/bg/analysis/1805900/the-beginnersguide-uks-carbon-trading-schemes>.
- [6] CHAABANE, A., A. RAMUDHIN, AND M. PAQUET. *Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme*. International Journal of Production Economics. 2010.
- [7] GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. and GROSSMANN, I.E. *Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty*. University Rovira i Virgili and Carnegie Mellon University, 2008.
- [8] Shapiro, J. F. *Modeling the Supply Chain*. Duxbury, 2001.
- [9] AZAPAGIC, A. and CLIFT, R. *Life cycle assessment and multiobjective optimization*. Journal of Cleaner Production. 135-143. 1999.
- [10] QI, Y. and CHEN, X. *Improved Life Cycle Assessment of Recycling Organic Wastes for Practice*. Journal of Cleaner Production. August 2017.
- [11] GARCIA, N. RUIZ-FEMENIA, R. and CABALLERO, J. *Teaching mathematical modeling software for multiobjective optimization in chemical engineering courses*. Education for Chemical Engineers. E169-e180. 2012

- [12] AMOSA, M.K. *GAMS supported optimization and predictability study of a multi-objective adsorption process with conflicting regions of optimal operating conditions*. Computers & Chemical Engineering, 2016.
- [13] LÖHNDORF, N. *An empirical analysis of scenario generation methods for stochastic optimization*. WU Vienna University of Economics and Business, 2016.
- [14] RUIZ-FEMENIA, R. *Incorporating CO₂ emission trading in the optimal design and planning of chemical supply chain networks under uncertainty*. University of Alicante, 2012.
- [15] <https://jesusgarciaj.com/2010/01/22/la-curva-de-distribucion-normal/>
- [16] KOSTIN, A.M. *Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty*. Chemical Engineering Research and Design, 2011.
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Cumulative_distribution_function
- [18] Aseeri, A., Gorman, P., Bagajewicz, M., 2004. *Financial risk management in offshore oil infrastructure planning and scheduling*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Special issue honoring George Gavalas 43 (12), 3063–3072
- [19] SCHÜTZ, P. *Supply chain design under uncertainty using sample average and dual decomposition*. Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- [20] EMELOGU, A. *An enhanced sample average approximation method for stochastic optimization*. Mississippi State University, 2016.

7. Notación

Índices

i	Tecnologías de proceso
j	Plantas
k	Almacenes
l	Mercados
p	Productos químicos
s	Escenarios
t	Periodos de tiempo

Conjuntos

$IN(p)$	Conjunto de tecnologías de proceso que consumen p
$MP(i)$	Conjunto de productos p de la tecnología i
$OUT(p)$	Conjunto de tecnologías de proceso que producen p

Parámetros

$\overline{CE_{i,j,t}^{PL}}$	Límite superior de la capacidad de expansión de la tecnología i en la planta j en el periodo t
$\underline{CE_{i,j,t}^{PL}}$	Límite inferior de la capacidad de expansión de la tecnología i en la planta j en el periodo t
$\overline{CE_{k,t}^{WH}}$	Límite superior de la capacidad de expansión del almacén k en el periodo t
$\underline{CE_{k,t}^{WH}}$	Límite inferior de la capacidad de expansión del almacén k en el periodo t
$\overline{D_{l,p,t}^{MK}}$	Límite superior en la demanda de producto p en el mercado l en el periodo t en Tn/año
$\underline{D_{l,p,t}^{MK}}$	Límite inferior en la demanda de producto p en el mercado l en el periodo t
IMP^{EN}	Resultado acumulado de LCIA para el indicador GWP asociado al consumo de 1 MJ de energía en Kg CO ₂ -eq/MJ

IMP_p^{RM}	Resultado acumulado de LCIA para el indicador GWP asociado al consumo de 1 Kg de materia prima p en Kg CO ₂ -eq/Kg
IMP^{TR}	Resultado acumulado de LCIA para el indicador GWP asociado al transporte de 1 Km de una tonelada de producto p en Kg CO ₂ -eq/Tn Km
ir	Tipo de interés
\overline{FCI}	Límite superior del capital total invertido
$nexp_{i,j}^{PL}$	Número máximo de expansiones de la capacidad de la tecnología i disponible en la planta j
$nexp_k^{WH}$	Número máximo de expansiones de capacidad del almacén k
NT	Número de periodos de tiempo
$\overline{PU}_{j,p,t}$	Límite superior en las compras de producto p en la planta j en el periodo t
$\underline{PU}_{j,p,t}$	Límite inferior en las compras de producto p en la planta j en el periodo t
$\overline{Q}_{j,k,p,t}^{PL}$	Límite superior de producto p transportado desde la planta j hasta el almacén k en el periodo t y escenario s
$\underline{Q}_{j,k,p,t}^{PL}$	Límite inferior de producto p transportado desde la planta j hasta el almacén k en el periodo t y escenario s
$\overline{Q}_{k,l,p,t}^{WH}$	Límite superior de producto p transportado desde el almacén k hasta el mercado l en el periodo t y escenario s
$\underline{Q}_{k,l,p,t}^{WH}$	Límite inferior de producto p transportado desde el almacén k hasta el mercado l en el periodo t y escenario s
sv	Valor de rescate de la cadena de suministro
tor_k	Índice de rotación del almacén k
$\mu_{i,p}$	Coeficiente de balance de materia asociado a la tecnología i y producto p
φ	Impuesto fiscal
$\gamma_{l,p,t}^{FP}$	Precio del producto final p en el mercado l en el periodo t en \$/Tn
$\gamma_{j,p,t}^{RM}$	Precio de la materia prima p en la planta j en el periodo t en \$/Tn
$v_{i,j,p,t}$	Coste de producción del producto final p en la tecnología i en la planta j durante el periodo de tiempo t

$\pi_{k,t}$	Coste de inventario por unidad de producto p almacenado en el almacén k durante el periodo de tiempo t
$\omega_{j,k,p,t}^{PL}$	Coste unitario de transporte del producto p desde la planta j al almacén k en el periodo t
$\omega_{k,l,p,t}^{WH}$	Coste unitario de transporte del producto p desde el almacén k al mercado l en el periodo t
$\alpha_{i,j,t}^{PL}$	Término de inversión variable asociado a la tecnología i y planta j en el periodo t en \$ año/Tn
$\beta_{i,j,t}^{PL}$	Término de inversión fijo asociado a la tecnología i y planta j en el periodo t en k\$
$\alpha_{k,t}^{WH}$	Término de inversión variable asociado al almacén k en el periodo t
$\beta_{k,t}^{WH}$	Término de inversión fijo asociado al almacén k en el periodo t
$\beta_{j,k,t}^{TPL}$	Término de inversión fijo asociado al establecimiento de una conexión de transporte entre la planta j y el almacén k en el periodo t
$\beta_{k,l,t}^{TWH}$	Término de inversión fijo asociado al establecimiento de una conexión de transporte entre el almacén k y el mercado l en el periodo t
$\eta_{i,p}^{EN}$	Consumo de energía por unidad de producto manufacturado p con la tecnología i en TFOE/Tn
$\lambda_{j,k}^{PL}$	Distancia entre la planta j y el almacén k en Km
$\lambda_{k,l}^{WH}$	Distancia entre el almacén k y el mercado l en Km
τ	Porcentaje mínimo deseado de la capacidad disponible instalada que debe ser utilizada

Variables

$Buy_{t,s}^{CO2}$	Derechos de emisión comprados
$C_{i,j,t}^{PL}$	Capacidad de producción de la tecnología i en la planta j en el periodo t en Tn/año
$CE_{i,j,t}^{PL}$	Capacidad de expansión de la tecnología i en la planta j en el periodo t
$C_{k,t}^{WH}$	Capacidad de almacenamiento del almacén k en el periodo t en Tn

$CE_{k,t}^{WH}$	Capacidad de expansión del almacén k en el periodo t
$CF_{t,s}$	Flujo de efectivo en el periodo t y escenario s
$Cost_{t,s}^{CO_2}$	Coste de los derechos de emisión de CO ₂
$DEP_{t,s}$	Depreciación del capital invertido
FCI	Capital fijo total invertido
$FTDC_{t,s}$	Fracción del importe depreciable total
$E[NPV]$	Valor esperado de la distribución de valores presentes netos
GWP^{EN}	Índice de contribución al calentamiento global por consumo de energía en las instalaciones auxiliares de la cadena de suministro
GWP^{RM}	Índice de contribución al calentamiento global por consumo de materias primas
GWP_{total}	Índice de contribución al calentamiento global total
GWP^{TR}	Índice de contribución al calentamiento global por transporte de productos entre los distintos nodos de la cadena de suministro
$GWP_{t,s}$	Emisiones totales de CO ₂ que tienen lugar en la cadena de suministro en el periodo t y escenario s
IL_{kt}	Nivel de inventario medio del almacén k en el periodo t
$INV_{k,p,t,s}$	Inventario de producto p en el almacén k en el periodo t y escenario s
$Max_t^{CO_2}$	Límite de libre emisiones de CO ₂ en el periodo t
$NE_{t,s}$	Beneficios netos en el periodo t y escenario s
$Net_{t,s}^{CO_2}$	Ingresos netos conseguidos a través del comercio de emisiones
NPV_s	Valor presente neto del escenario s
$Price_{t,s}^{CO_2}$	Precio de los derechos de emisión de CO ₂
$prob_s$	Probabilidad de ocurrencia del escenario s
$PU_{j,p,t,s}$	Cantidad de producto p comprado por la planta j en el periodo t y escenario s
$Q_{j,k,p,t,s}^{PL}$	Cantidad de producto p transportado desde la planta j hasta el almacén k en el periodo t y escenario s
$Q_{k,l,p,t,s}^{WH}$	Cantidad de producto p transportado desde el almacén k hasta el mercado l en el periodo t y escenario s

$SA_{l,p,t,s}$	Cantidad de producto p vendido en el mercado l en el periodo t y escenario s
$Sales_{t,s}^{CO_2}$	Derechos de emisión vendidos
$W_{i,j,p,t,s}$	Cantidad de producto p producido por la planta j en el periodo t y escenario s
$X_{l,j,t}^{PL}$	Variable binaria (toma el valor 1 cuando la tecnología i de la planta j expande su capacidad en el periodo de tiempo t, y 0 cuando no)
$X_{k,t}^{WH}$	Variable binaria (toma el valor 1 cuando se expande la capacidad del almacén k en el periodo de tiempo t, y 0 cuando no)
$Y_{j,k,t,s}^{PL}$	Variable binaria (toma el valor 1 cuando existe una conexión de transporte entre la planta j y el almacén k en el periodo t y escenario s, y 0 cuando no).
$Y_{k,l,t,s}^{WH}$	Variable binaria (toma el valor 1 cuando existe una conexión de transporte entre el almacén k y el mercado l en el periodo t y escenario s, y 0 cuando no).

8. Anexos

8.1. Cálculo desviación estándar

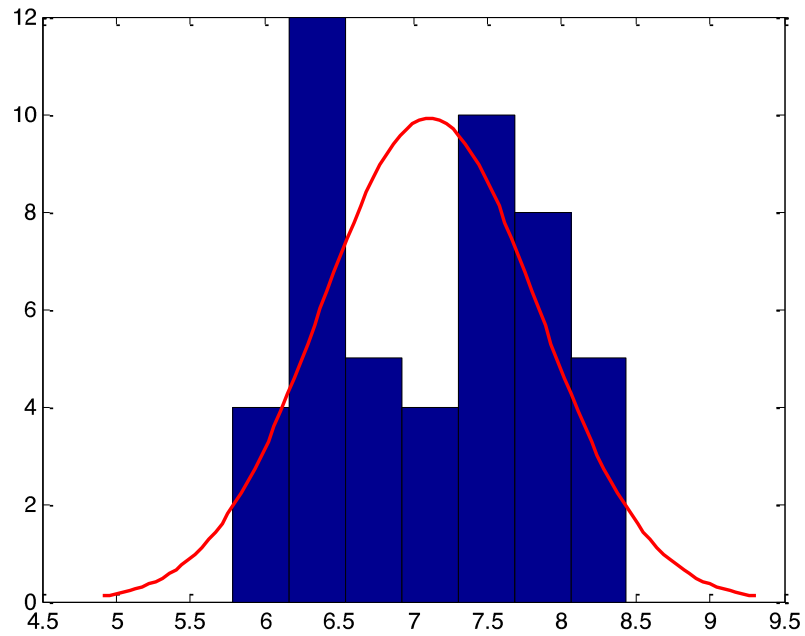


Figura 18. Distribución normal de probabilidad generada para el cálculo de la desviación estándar en el caso del año 2012. Los parámetros obtenidos para este caso son: $\mu=7.1102$; $\sigma=0.7330$.

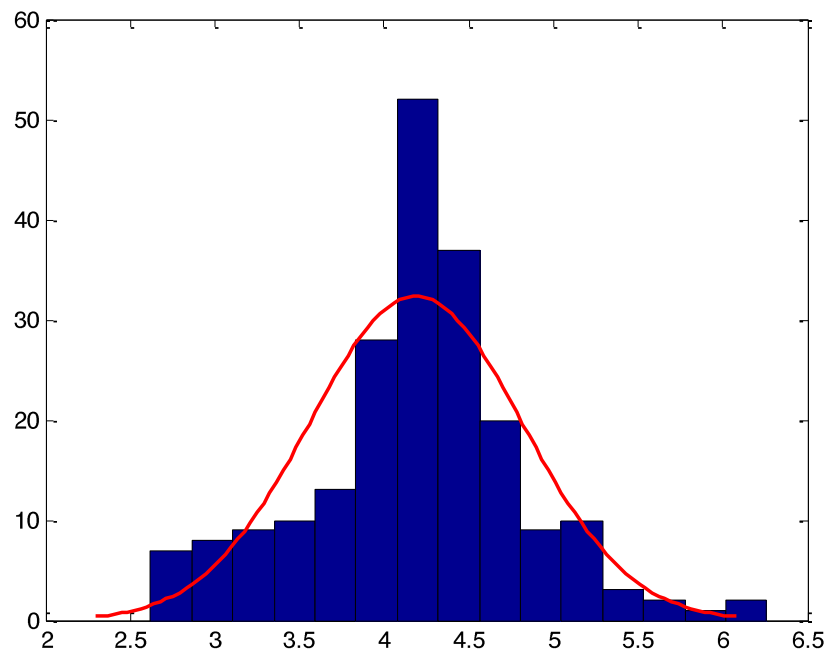


Figura 19. Distribución normal de probabilidad generada para el cálculo de la desviación estándar en el caso del año 2013. Los parámetros obtenidos para este caso son: $\mu=4.1874$; $\sigma=0.6309$.

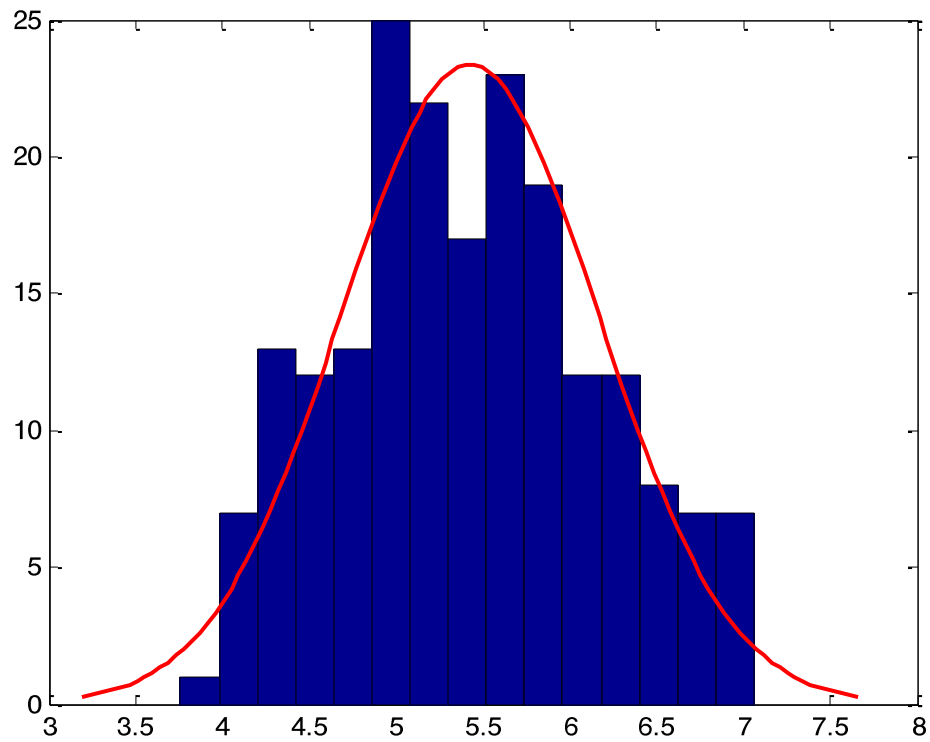


Figura 20. Distribución normal de probabilidad generada para el cálculo de la desviación estándar en el caso del año 2014. Los parámetros obtenidos para este caso son: $\mu=5.4245$; $\sigma=0.7442$.

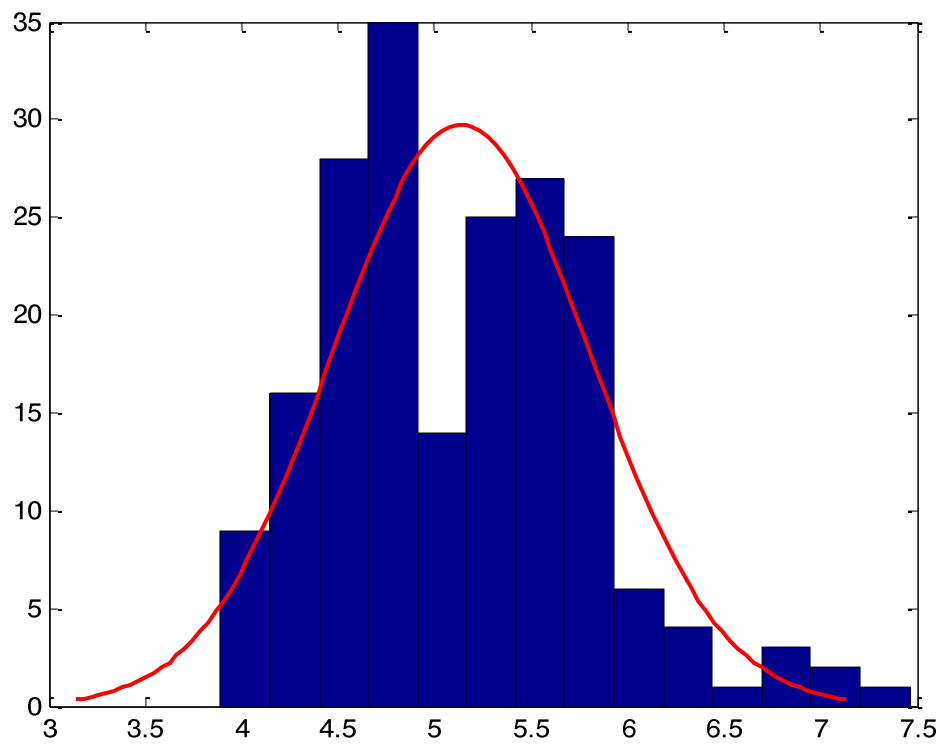


Figura 21. Distribución normal de probabilidad generada para el cálculo de la desviación estándar en el caso del año 2016. Los parámetros obtenidos para este caso son: $\mu=5.1372$; $\sigma=0.6665$.

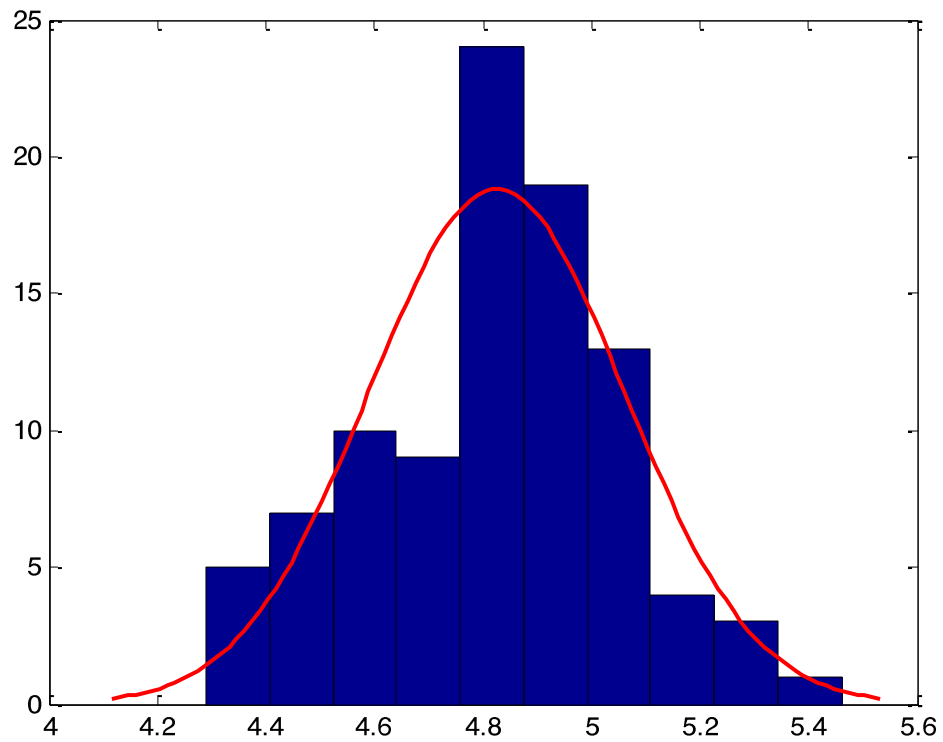


Figura 22. Distribución normal de probabilidad generada para el cálculo de la desviación estándar en el caso del año 2017. Los parámetros obtenidos para este caso son: $\mu=4.8252$; $\sigma=0.2358$.